

제 1 차 년 도
연 차 보 고 서

KRISS-95-086-IR

저온초전도 접합 응용기술 개발

Development of Junction Application Technology
at Low Temperature

연 구 기 관
재단법인 한국표준과학연구원

과 학 기 술 처

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. 관리번호	2. 수행부서 초전도 그룹	3. 발행일 1995. 4.
4. 제목/부제 저온초전도 접합 응용기술 개발			7. 주제분야 0602,1402,1407	
5. 저자(공저자) 박용기, 권혁찬, 김진목, 유경화, 이용호, 임청무, 이상길		8. 수행기관 보고서번호 KRISS-95-086-IR		
6. 수행기관 (연구원 이외의 공동 혹은 위촉연구기관)		9. 계약번호		
		10. 자료내역 3차년도중 1차년도보고서		
11. 위탁기관		과학기술처		
12. 보충사항 (관련업무를 기록한다)				
13. 초록 (주요 참고문헌이나 관련문헌이 있을 경우 여기에 명시한다)				
<p>DROS는 자속-전압 변환계수가 standard dc SQUID에 비해 약 100배 정도 더 커서 자속변조를 하지 않기 때문에 slew rate 및 측정할 수 있는 bandwidth가 높다. 따라서 자기잡음이 시간적으로 크게 변하는 차폐되지 않은 공간에서 자력계로 사용하기에도 매우 유리하다. 본 연구에서는 기존 접합을 이용한 DROS를 이용하여 보통 $5 \text{ mV}/\Phi_0$ 내외의 매우 큰 자속-전압 변환계수를 얻었다. 한편 간단한 구동회로를 이용하여 SQUID의 자속잡음을 측정한 결과 $9 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$의 값을 얻었고 유효자장잡음은 $36 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 계산되는데 검출코일의 검출면적을 증가시키면 개선될 수 있다. SQUID의 잡음특성을 개선하고 compact한 multichannel시스템을 위해 검출코일이 SQUID와 같은 기판상에 집적화된 magnetometer 및 gradiometer를 설계하고 일차 제작하였다.</p> <p>미소접합 제작을 위해서는 submicron 영역의 선폭을 제작할 수 있는 전자빔 patterning 기술이 필요하다. 따라서 본 1차년도에는 주사형 전자현미경에 전자빔의 주사를 조절하여 writing할 수 있는 장치를 부착하여 전자빔 식각을 하기위해 주사형 전자현미경을 설치하였으며, writing할 수 있는 Proxy Writer를 구매하였다. 미소접합 제작 및 단전자 효과를 연구하기에 앞서 가장 간단한 mesoscopic 소자라고 생각되는 사각고리 모양의 Aharonov-Bohm 소자를 제작하였으며, $T = 20 \text{ mK}$과 150 mK에서 자기저항을 측정하였다. 측정된 자기저항을 FFT시켰을 때 h/e에 해당하는 비교적 분명한 peak을 관측할 수 있었다.</p>				
14. 키워드 (6-12개) 생체자기계측, 조셉슨 접합, DROS, 자속-전압 변환계수, 자력계, 자장잡음, 단전자 효과, Aharonov-Bohm 소자, 자기저항				
15. 배포구분	16. 해제기간		17. 면수	120
01	199 년 월 ~ 년 월		18. 가격	

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET	1. REPORT NO.	2. PERFORMING LAB. Superconductivity Group	3. REPORT DATE 1995. 4
4. TITLE/SUBTITLE Development of Junction Application Technology at Low Temperature		7. SUBJECT CATEGORY 0602,1402,1407	
5. AUTHOR(S) Y.K.Park, H.C.Kwon, J.M.Kim, K.-H.Yoo, Y.H.Lee, C.M.Lim, S.K.Lee		8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. KRISS-95-086-IR	
6. PERFORMING ORGANIZATION NAME		9. CONTRACT OR GRANT NO.	
		10. TYPE OF REPORT The 1st report of three years	
11. SPONSERING ORGANIZATION MOST			
12. SUPPLEMENTARY NOTES			
13. ABSTRACT Double Relaxation Oscillation SQUID (DROS) has a high slew rate and wide bandwidth, because it uses no flux modulation due to a high flux-voltage transfer coefficient which is 100 times as high as the standard dc SQUID. So it may be used as a magnetometer in the unshielded environment where the field noise changes temporally. In this study, we observed a large flux-voltage transfer coefficient of about 5 mV/ Φ_0 using DROS with a reference junction. The flux noise measured with a simple driving circuit is $9 \mu \Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$, corresponding to an effective field noise of 36 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ and it may be improved using larger pick-up coil. To improve the noise performance and to make the SQUID be suitable for a compact multichannel system, we designed and fabricated new magnetometers and gradiometers with the integrated pick-up loop and DROS on a single chip. Preliminary test of them are in progress. In order to fabricate a ultra small junction, submicron electron beam lithography technology is needed. In this study, we installed a SEM and purchased Proxy Writer that has a direct writing function by controlling e-beam injection. As a preliminary study for small junction technology, we made a square loop shaped Aharonov-Bohm device with Sb, Ag, Pd metal as the most simple mesoscopic device and measured magnetoresistances at temperatures of 20 mK and 150 mK. From the FFT spectra of the measured data, we observed clear peaks corresponding to h/e oscillations.			
14. KEYWORDS bicmagnetism, Josephson junction, DROS, flux-voltage transfer coefficient, magnetometer, magnetic field noise, single electron, Aharonov-Bohm device, magnetoresistance			
15. CLASSIFICATION	16. SCHEDULE OF DECLASSIFICATION	17. NO. OF PAGES	120
01	19 . . ~ . . .	18. PRICE	

제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 "저온초전도 접합 응용기술 개발" 과제의 1 차년도 연차보고서로 제출합니다.

1995년 4월.

주관연구기관명 : 한국표준과학연구원

연구책임자 : 박 용 기

연 구 원 : 권 혁 찬, 김 진 목

유 경 화, 이 용 호

임 청 무, 이 상 길

요 약 문

I. 연구제목

저온초전도접합 응용기술 개발(1 차년도)

II. 연구개발의 목적 및 중요성

본 연구의 최종 목표는 실용화에 앞서 의학적 연구용으로 활용될 수 있는 생체 자기 계측용 7 channel system을 개발하고, 100 nm 이하의 미소접합 제작기술을 확보하는 데 있다.

산업이 발달하고 생활이 윤택해짐에 따라 평균수명이 길어지면서 노화현상에 관련된 의료비용도 크게 늘어나고 있는 추세이며, 조기진단의 중요성이 인식되면서 전체 의료비용중 의료진단과 관련된 비용이 상당한 부분을 차지하고 있음을 고려할 때, 생체자기 계측과 같은 새로운 의료진단기기의 개발은 의학적으로뿐만 아니라 경제적으로도 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다.

SQUID는 지자기의 약 100억분의 1 정도의 작은 자기장(10^{-14} 테슬라)을 측정할 정도로 높은 감도를 지니고 있는 자기센서로, 이를 이용하면 인체에서 세포 활동에 의해 발생하는 극히 미약한 자기 신호를 감지할 수 있어 새로운 의료진단장치에 활용이 가능하다.

접합의 크기가 매우 작아지면 금속의 미소한 접합은 매우 낮은 온도에서 쿨롱장해(Coulomb Blockade) 현상이 나타나게 되며 이를 이용하면 전자의 흐름을 하나씩 조절할 수 있는 Single Electron Tunneling(SET) 소자를 제작할 수 있다. SET 소자를 이용하면 매우 정밀한 electrometer 개발이 가능하며, 양자화된 전류의 흐름을 이용하여 전류표준에도 이용될 경우 조셉슨 소자를 이용한 전압표준, 양자홀 소자를 이용한 저항표준과 함께 상호 검증이 가능하므로 미국, 독일 등의 선진표준기관에서 활발한 연구가 진행중이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 생체자기 계측용 저온초전도 SQUID system 제작

- SQUID 센서의 제작공정 개선
 - Nb/AIO_x/Nb 접합 제작기술의 신뢰성 향상을 위해 에칭방법, 절연방법, Nb 배선 방법 등의 세부기술 개발
- Standard DC SQUID system의 특성조사
- 새로운 SQUID 센서인 DROS의 설계·제작 및 특성
 - 기존접합을 이용한 DROS 설계 및 포토마스크 제작 및 특성조사
 - 기존의 standard DC SQUID에 비해 자속/전압 변환계수가 약 100 배 정도로 큰 SQUID 센서 개발
- DROS 3 channel system insert 제작
 - DROS를 이용한 axial 형태의 2 차 미분형 gradiometer를 채택
 - modular 형태의 3 channel insert 제작
- SQUID controller 제작
 - 4 개의 SQUID 센서를 구동할 수 있는 multichannel SQUID controller 를 설계 및 제작
- 성능향상을 위한 새로운 DROS의 설계·제작
 - planar magnetometer 및 gradiometer 포함
 - relaxation 주파수를 1 GHz로 높여 잡음 특성 개선

2. 미소접합 제작

- 전자빔을 이용한 미소가공 기술 연구
 - 전자빔 리소그래피 전용 주사현미경 설치
 - 전자빔 가속전압의 최적조건 결정
- Aharonov-Bohm 효과 소자 제작 및 특성 조사
 - 가장 간단한 구조의 mesoscopic device 인 Aharonov-Bohm 소자 제작
 - Aharonov-Bohm 소자의 특성조사

IV. 연구의 결과 및 활용에 대한 건의

1. 생체자기 계측용 저온초전도 SQUID system 제작

- SQUID 센서 제작기술의 신뢰성 향상을 위한 제작공정 개선
 - 다층박막의 절연 및 배선 공정에서 포토레지스트의 overhang 구조를 실현시킬 수 있는 공정을 확립함으로써 step coverage 향상
 - 접합면적을 defining 할 때 양극산화 대신에 Reactive Ion Etching(RIE) 방법을 도입
 - 절연막으로서 PECVD로 SiO₂를 2 회 증착
 - SiO₂ 박막에 의한 Pd 저항의 부착력 저하를 방지하도록 강구
 - Nb wire를 이용한 초전도 bonding을 위해 Nb/Pd pad 제작
 - 제작된 Nb/AlO_x/Nb 접합의 quality factor $V_m(=I_cR(2mV))$ 값이 약 70 mV 로 매우 우수한 특성을 보임
- Standard DC SQUID system의 특성조사
 - SQUID의 잡음 특성은 생체자기 신호를 검출하기에 충분하지만 자속-전압 변환계수가 작아서 slew rate가 제약을 받으므로 매칭회로를 사용하면 이를 개선할 수 있으나, 근본적으로 매칭 코일이 차지하는 부피때문에 자속-전압 변환계수가 매우 큰 DROS를 사용하는 것이 유리하다고 판단됨
- DROS의 설계 · 제작 및 특성
 - 새로운 SQUID 센서인 DROS 설계 및 포토마스크 제작
 - 기존 SQUID 대신에 기존 접합을 사용
 - SQUID 제작 및 특성조사
 - 기존의 standard DC SQUID에 비해 약 100 배 정도로 큰 자속-전압 변환계수를 가짐
- DROS 3 channel system insert 제작
 - Nb wire bonding 기술을 확립하였으며 bonding 된 부분의 임계전류가

50 mA 이상으로 나타남

- axial 형태의 2 차 미분형 gradiometer를 이용한 modular 형태의 3 channel insert 제작
- 자속잡음 : $9 \mu \Phi / \sqrt{\text{Hz}}$
- 자장-자속 전달계수 : $4 \text{ nT}/\Phi_0$
- 유효자장잡음 : $36 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$
- SQUID controller 제작
 - 4 개의 SQUID 센서를 구동할 수 있는 multichannel SQUID controller 를 설계 및 제작
- 성능향상을 위한 새로운 DROS의 설계 · 제작
 - relaxation oscillation 주파수를 1 GHz로 높여 잡음특성을 개선
 - Planar 형태의 magnetometer 및 gradiometer를 포함하도록 집적화
- 본 연구결과 개발될 system을 사용하면 심자도는 물론 뇌자도 검출도 가능 할 것으로 기대되므로 선진국과 대등한 수준의 측정기술을 확보하며, 의료진 단기기와 각종 정밀계측기기와 같은 고부가가치의 상품을 개발할 수 있는 기반이 될 것이다.

2. 미소접합 제작

- 전자빔을 이용한 미소가공 기술 연구
 - MonteCarlo simulation에 의해 미세패턴에 적합한 전자 가속전압 도출
 - 전자빔 리소그래피용 resist의 spin coating 조건을 실험적으로 파악
 - 전자빔 리소그래피 전용 주사현미경 설치
- Aharonov-Bohm 효과 소자 제작 및 특성 조사
 - Sb, Ag, Pd 금속을 이용하여 선폭이 100 nm, 지름이 약 $1 \mu\text{m}$ 인 고리 모양의 소자를 Si 기판위에 제작
 - 제작된 소자로부터 20 mK과 150 mK에서 h/e 주기의 자기저항 신호를 측정하므로써 Aharonov-Bohm 효과 관측
- 미소접합 제작기술의 확보로 nanostructure의 새로운 응용소자 개발이 가능.

SUMMARY

I . Project Title

Development of Junction Application Technology at Low Temperature

II . Project Objective and Significance

The Objective of this project is to develop a biomagnetic 7 channel system that can be used for medical research and to develop a fabrication technology for ultra small junctions less than 100 nm.

Owing to the progress of industry and living in abundance, the average length of life becomes longer and a fee for medical treatment is on the increase, and because a considerable portion of the medical fee is related to medical diagnoses, it is very important to develop the new diagnoses such as biomagnetic measurements.

Since SQUID is a very sensitive magnetic sensor available, it can be used to detect extremely weak biomagnetic fields from the human body that is applicable to medical diagnosis.

As junction size becomes smaller, it shows quantum phenomena such as coulomb blockade at very low temperature. Since this property can be applied to Single Electron Tunneling(SET) devices which can make electrons to pass the junction one by one, a very sensitive electrometer is possible with SET devices. If SET devices are also realized for current standard, it is possible to verify reciprocally from the voltage standard using Josephson junction and the resistance standard using Quantum Hall Devices, so many advanced institutes carry on competitive researches on it.

III. Contents

1. Construction of Biomagnetic SQUID system

- Process improvement for SQUID Sensor Fabrication
 - Establishment of Etching, Insulation and Nb metallization technology for reliable Nb/AlO_x/Nb junctions
- Characterization of Standard DC SQUID system
- Design, Fabrication and Characterization of DROS
 - Design of DROS as a second generation SQUID
 - DROS with reference junction
 - Fabrication and Characterization of DROS
- Construction of 3 channel DROS system insert
 - Axial type 2nd order gradiometer with DROS
 - Modular type 3 channel insert
- Construction of SQUID controller
 - Multichannel SQUID controller driving 4 SQUID sensors
- Design of Improved DROS
 - relaxation frequency of around 1 GHz
 - Planar magnetometer, gradiometer

2. Fabrication of Ultra Small Junctions

- Processing Technology of ultra small junctions using electron beam
 - Installation of SEM for electron beam lithography
 - Optimization of electron beam voltage
- Fabrication and Characterization of Aharonov-Bohm devices
 - Fabrication of Aharonov-Bohm devices
 - Characterization of Aharonov-Bohm devices

IV. Results and Recommendation for Application

1. Construction of Biomagnetic SQUID system

- Process improvement for SQUID Sensor Fabrication
 - Improved the step coverage by realizing photoresist overhang structure for multilayer insulation and metallization
 - Used the Reactive Ion Etching(RIE) instead of anodization for junction defining
 - Deposited SiO₂ two times by PECVD
 - Developed a process not to lower the adhesion of Pd film due to SiO₂ film
 - Made the Nb/Pd pad for superconductive bonding of Nb wire
 - Fabricated high quality Nb/AlO_x/Nb junctions with $V_m(=I_cR(2mV))$ of about 70 mV
- Characterization of Standard DC SQUID systems
 - In spite of the high sensitivity, standard DC SQUID is not suitable to multichannel system because the slew rate is restricted by the small flux to voltage transfer coefficient circuit. Though it can be improved by matching circuit, DROS is more profitable.
- Design, Fabrication and Characterization of DROS
 - Design of DROS as a second generation SQUID
 - Fabrication and Characterization of DROS
 - Had 100 times larger flux to voltage transfer coefficient than the standard DC SQUID
- Construction of 3 channel DROS system insert
 - Developed the superconductive bonding technology of Nb wire and its critical current was larger than 50 mA

- Axial type 2nd order gradiometer with DROS
- Modular type 3 channel insert
- Flux noise : $9 \mu \Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$
- Field-Flux transfer coefficient : $4 \text{ nT} / \Phi_0$
- Effective field noise : $36 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$
- Construction of SQUID controller
 - Multichannel SQUID controller driving 4 SQUID sensors
- Design of Improved DROS
 - Integrated planar magnetometer and gradiometer
 - improve the sensitivity by increasing relaxation frequency to 1 GHz
- The performance of this system will be enough to detect signals from the heart and brain, reaching the level of advanced countries. On the basis of such high technology, expensive medical diagnostic instruments can be developed

2. Fabrication of Ultra Small Junctions

- Processing technology of ultra small junctions using electron beam
 - Optimized the acceleration voltage of electron for fine patterns by Monte Carlo simulation method
 - Characterization of spin coating conditions for E-beam resist
 - Installation of SEM for electron beam lithography
- Fabrication and Characterization of Aharonov-Bohm Devices
 - Fabrication of ring shaped Aharonov-Bohm devices with a line width of 100 nm, a diameter of about $1 \mu\text{m}$ using Sb, Ag, Pd metals on the Si wafer
 - Observed Aharonov-Bohm effect by measuring a magnetoresistance oscillations with h/e periodicity at 20 mK and 150 mK
- Our results will form the basis of nanostructure devices

Contents

Chapter 1. General Overviews	1
Section 1. Introduction	1
Section 2. Background and Importance	4
Section 3. Objectives	8
Section 4. Research Contents and Scope	8
Section 5. Publications and Patents	9
Chapter 2. Construction of Biomagnetic SQUID system	11
Section 1. Introduction	11
Section 2. Process Improvement for SQUID Sensor Fabrication	12
Section 3. Design, Fabrication and Characterization of DROS	21
Section 4. Construction of 3 channel DROS system insert	32
Section 5. Construction of SQUID controller	38
Section 6. Design of Improved DROS	55
Section 7. Conclusion	65
Chapter 3. Fabrication of Ultra Small Junctions	67
Section 1. Introduction	67
Section 2. Processing Technology of ultra small junctions	77
Section 3. Fabrication and Characterization of Aharonov-Bohm Devices	93
Section 4. Conclusion	106

목 차

제 1 장 개 관	1
제 1 절 서 설	1
제 2 절 연구의 배경 및 필요성	4
제 3 절 연구의 목표	8
제 4 절 연구의 내용 및 범위	8
제 5 절 연구결과 발표 및 특허	9
제 2 장 생체자기 계측용 저온초전도 SQUID system 제작	11
제 1 절 서 설	11
제 2 절 SQUID 센서의 제작공정 개선	12
제 3 절 DROS의 설계 · 제작 및 특성	21
제 4 절 DROS 3 channel system insert 제작	32
제 5 절 SQUID controller 제작	38
제 6 절 성능향상을 위한 새로운 DROS의 설계 · 제작	55
제 7 절 결 론	65
제 3 장 미소접합 제작	67
제 1 절 서 설	67
제 2 절 전자빔을 이용한 미소가공 기술 연구	77
제 3 절 Aharanov-Bohm 효과 소자 제작 및 특성 조사	93
제 4 절 결 론	106

제 1 장 개 관

제 1 절 서 설

최근 10 여년간 산업의 발전은 가히 혁명적이라고 할 만큼 급속하게 진행되어 왔는데, 이와함께 정밀 측정 기술의 필요성에 대한 인식도 높아지고 있다. 따라서 각국의 표준기관에서는 미래산업의 기반기술로서 측정 기술에 대한 연구를 꾸준히 하고 있는데, 특히 저온을 이용한 것으로서 초전도 현상을 이용한 초전도양자간섭 소자(SQUID : Superconducting QUantum Intereference Device)와 단전자(Single Electron) 효과를 이용한 Single Electron Tunneling (SET) 소자는 첨단 측정 기술에 필수적인 소자로 관심을 끌고 있다.

SQUID는 초전도체/절연체/초전도체로 이루어진 조셉슨 접합을 응용한 매우 정밀한 자기 센서로서 다른 어떤 센서와도 비교할 수 없는 높은 감도를 가지기 때문에 정밀한 측정이 요구되는 분야에 널리 응용되고 있지만, 특히 생체자기신호를 측정하여 의료진단에 활용하는 연구는 매우 활발하다.^[1,2]

인간의 심장, 두뇌 등으로부터는 매우 약한 자장이 발생하는데 이를 측정하려는 시도가 1969 년 미국 MIT 자기 연구소에서 시작되었으나 측정기술이 미비하여 어려움이 많았다. 그후 SQUID의 개발로 측정기술이 향상되고 특히 1980 년 이후 반도체 제작 기술의 발달과 더불어 초전도 박막을 이용한 고감도 SQUID 센서의 성능도 점차 향상되어 지자기의 100 억분의 1 정도의 작은 자기장(10^{-14} 테슬라)을 측정할 수 있게 되면서 미국과 유럽을 중심으로 생체자기 신호를 의학적으로 활용하려는 연구가 본격적으로 시작되었다. SQUID로 측정된 생체자기 신호를 의료진단에 활용하기 위해서는 여러 개의 센서를 이용하는 multichannel system을 구성함으로써 시간적 및 공간적인 분해능이 우수한 측정 결과를 얻는 것이 바람직하다. 따라서 지난 10 여년 동안은 SQUID의 감도, 측정 대역폭, slew rate 등의 성능 향상은 물론 센서의 부피를 줄이고 신호검출장치를 단순화하기 위한 새로운 SQUID

센서 및 신호 검출 기술의 개발에도 노력하였는데, 독일의 PTB에서 개발된 Additional Positive feedback(APF) 방식의 SQUID나 네덜란드의 Twente 대학에서 개발된 Double Relaxation Oscillation SQUID (DROS) 등은 multichannel system에 적합한 것으로 관심을 끌고 있다. 한편 SQUID 센서가 동작하기 위해서는 4.2 K 의 저온을 유지할 수 있는 시설과 액체헬륨이 필요하며, 비교적 신호가 큰 심자도는 헬륨홀츠 코일과 같이 지자기 및 저주파 잡음을 어느 정도 상쇄시킬 수 있는 시설만 갖추면 자기차폐실이 없이도 측정이 가능하지만 뇌자도의 경우 신호의 크기가 매우 작아서 자기차폐실이 없이는 불가능하다. 따라서 매우 민감한 자기 센서인 SQUID 를 각종 자기잡음에 노출되어 있는 환경에서 사용할 경우에는 측정된 신호로부터 자기잡음을 상쇄시키는 것이 어려운 기술적 문제이다. 또한 측정결과를 분석하기 위해서는 임상학적으로 좀더 많은 연구결과가 축적되어 정확한 진단을 위한 자료가 필요하다. 하지만 장기적으로 볼때 경제적인 비용은 초전도 자석을 사용하는 기존의 MRI-CT 에 비하여 비싸지 않으며, 병원과의 공동연구를 꾸준히 하므로써 머지않은 장래에 이 기술은 일반화될 것으로 전망된다. 이와같이 SQUID를 이용한 의료진단기기의 실용화 가능성이 높아지면서 최근에는 의학과 기업연구소에서도 우수한 자기차폐실을 갖추면서 적극적으로 참여하고 있고, 특히 일본에서는 정부와 기업이 공동으로 참여하여 세계 최대의 256 channel Nb SQUID 뇌자도 측정 장치를 개발하고 있으며, 미국의 BTi사와 캐나다의 CTF사에서는 64 channel system을 상용화하여 약 200 만달러에 공급하기 시작하였다. 국내에서는 생체자기에 관련된 연구는 전무한 실정이고, 본 연구원에서 Nb SQUID를 개발하여 자기잡음 환경에서 심자도를 측정할 정도이지만, 심자도 측정용 Nb SQUID의 개발을 통하여 SQUID 센서의 제작기술과 신호 검출기술이 충분히 축적되었으므로, 본 연구에서는 이를 바탕으로 multichannel system에 적합하도록 현재의 DC-SQUID와 비교하여 자속-전압 변환계수가 약 100 배 이상 큰 새로운 방식의 SQUID인 DROS를 개발하고 센서의 제작공정을 보완하여 신뢰성을 향상시키므로써 궁극적으로 7 channel system을 완성하여 의학과와의 공동 연구가 가능하도록 기반을 구축할 계획이다.

한편 SQUID에 이용된 조셉슨 접합의 크기가 수 μm 내외인데 비해 금속/절연체/금속으로 이루어진 접합의 크기가 100 nm 수준으로 초미소화되면 접합의 면적에 비례하는 전기용량 C 가 fF 이하로 작아지며, 온도가 100 mK 미만으로 낮아지게 되면 전자 하나의 쿨롱에너지 $E_c = e^2/2C$ 가 열에너지 $k_B T$ 보다 커지게 된다. 이러한 $E_c > k_B T$ 조건이 형성되면 외부에서 E_c 에 상응하는 전압을 걸어줄 때까지는 전자가 접합을 전혀 통과하지 못하는 쿨롱장해 (Coulomb blockade) 현상이 일어난다. 더우기 미소접합이 직렬로 2 개 이상 연결된 회로에서는 회로에 걸어주는 gate 전압을 조절하므로써 접합을 통과하는 전자를 하나씩 조절할 수 있는데 이것을 바로 단전자 효과라 한다. 이러한 쿨롱장해 및 단전자 효과에 대한 연구는 접합을 이루는 절연체내에 아주 작은 알갱이들을 집어넣은 시료를 이용하여 오래전에 시작되었으나^[3] 최근 nanolithography 기술의 발달로 100 nm 이하의 단전자 접합소자의 제작이 가능해짐에 따라 더욱 활발히 진행되어 근래에는 전류표준에의 응용도 제안되고 있다.^[4] 이 연구를 위해서는 미소접합 제작을 위한 전자빔 리소그래피 장비와 극저온을 얻기 위한 He^3/He^4 희석냉동기가 필요하기 때문에 국내에서는 본격적인 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구원에서는 1992년 He^3/He^4 희석냉동기를 도입하여 그동안 극저온에 대한 경험을 충분히 쌓았으며, 단전자 효과를 실험적으로 측정하기에 앞서 단전자 접합 제작에 필요한 주요변수의 최적조건을 찾기위해 단전자 접합의 I-V 특성을 이론적으로 계산하고, 단전자 접합의 I-V 특성은 외부 회로의 영향을 크게 받는다는 것을 밝혀낸 바 있다. 본 연구에서는 미소접합 제작에 필요한 nanolithography 기술을 개발하기 위해 새로이 설치된 전자빔 식각의 최적조건을 결정하기 위한 방법으로 가장 간단한 nanostructure라고 생각되는 고리 모양의 Aharonov-Bohm (AB) 소자를 제작하여 AB 효과를 측정하였으며 최종적으로는 미소접합의 제작기술을 개발할 계획이다.

제 2 절 연구의 배경 및 필요성

1. 연구개발의 배경

산업이 발달하고 생활이 윤택해짐에 따라 평균수명이 길어지면서 노화현상에 관련된 의학적인 수요도 크게 늘어나고 있는 추세이며, 조기진단의 중요성이 인식되면서 전체 의료비용중 의료진단과 관련된 비용이 상당한 부분을 차지하고 있음을 고려할 때, 생체자기 계측과 같은 새로운 의료진단기기의 개발은 의학적으로뿐만 아니라 경제적으로도 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다.

생명이 있는 동안 신체 각 부위의 세포는 끊임없이 활동하며 전기적인 신호에 의해 서로 유기적으로 정보를 교환하고 있는데 이때 표피에서 발생된 전위차를 측정하는 것이 심전도나 뇌파로서 현재 널리 사용되고 있다. 그러나 전기적 신호를 측정할 경우, 표피의 전기전도도가 각기 다르고 두개골의 구조에 의해 표피에서 발생하는 전위차가 왜곡될 수 있기 때문에 전류원에 대한 위치추정이 부정확해지는 단점이 있다. 반면에 생체자기 계측은 우선 비접촉식이므로 전극을 부착할 필요가 없어 측정을 위한 준비시간이 짧으므로 환자에게 불필요한 심리적 부담을 주지 않고, 두개골이나 표피가 자기적으로 투명하기 때문에 전류원에 의해 발생된 자장의 공간적인 왜곡이 작다. 또한 multichannel system을 이용하면 자장의 크기와 방향을 측정하므로써 자장발생원에 대한 3 차원적 정보를 얻을 수 있으며, 따라서 전류원에 대한 위치추정을 할 때 수 mm 이내의 오차를 가질 뿐이다.

한편 현재 널리 사용되고 있는 X-ray CT 나 MRI-CT 등의 진단방법은 우수한 공간 분해능을 가지지만 해부학적인 정보를 제공할 뿐이며 생체내의 동적인 정보는 제공하지 못하는 반면, SQUID를 이용한 심자도(心磁圖)나 뇌자도(腦磁圖) 측정은 인체의 구조적인 정보보다는 기능적인 정보를 얻는데 유용하게 사용될 수 있다. 특히 뇌에 대한 연구에서는 뇌의 자발적인 활동을 연구하여 간질병, 노인성 치매 등과 같은 정신질환의 진단에 활용됨은 물론 외부에서 자극(전기적, 시각적, 음성적)을 가했을때 뇌의 반응(evoked response)으로부터 뇌기능을 연구하는데 활용되

고 있다. 현재 세계적으로 생체자기 계측은 기존의 진단방법에 비해 특히 우수한 장점을 가지는 뇌에 대한 연구가 주류를 이루고 있는데 이를 이용하면 의료분야는 물론 기초의학에도 큰 진전이 있을 것으로 기대되기 때문에 선진국에서는 활발한 연구가 이루어지고 있다.

한편 현재의 전류표준은 전압표준에 응용되고 있는 조셉슨 효과와 저항표준에 응용되고 있는 양자홀 효과의 조합으로부터 얻어지고 있다. 그러나 단전자 효과를 응용한 전류표준이 확립되면 그림1-2-1과 같이 주파수(f), 전압(V), 전류(I) 사이에 표준 삼각관계가 형성되며 $\phi_0 = h/2e$ 와 $R_K = h/e^2$ 로 조합된 Josephson/Klitzing의 정의가 단전자 효과로부터 주어지는 전하량 e 를 이용한 절대 정의와 일치하는지 상호확인을 할 수 있다. 또한 단전자 효과는 매우 정밀한 electrometer 개발에 활용될 수 있으므로 선진표준기관을 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있다.

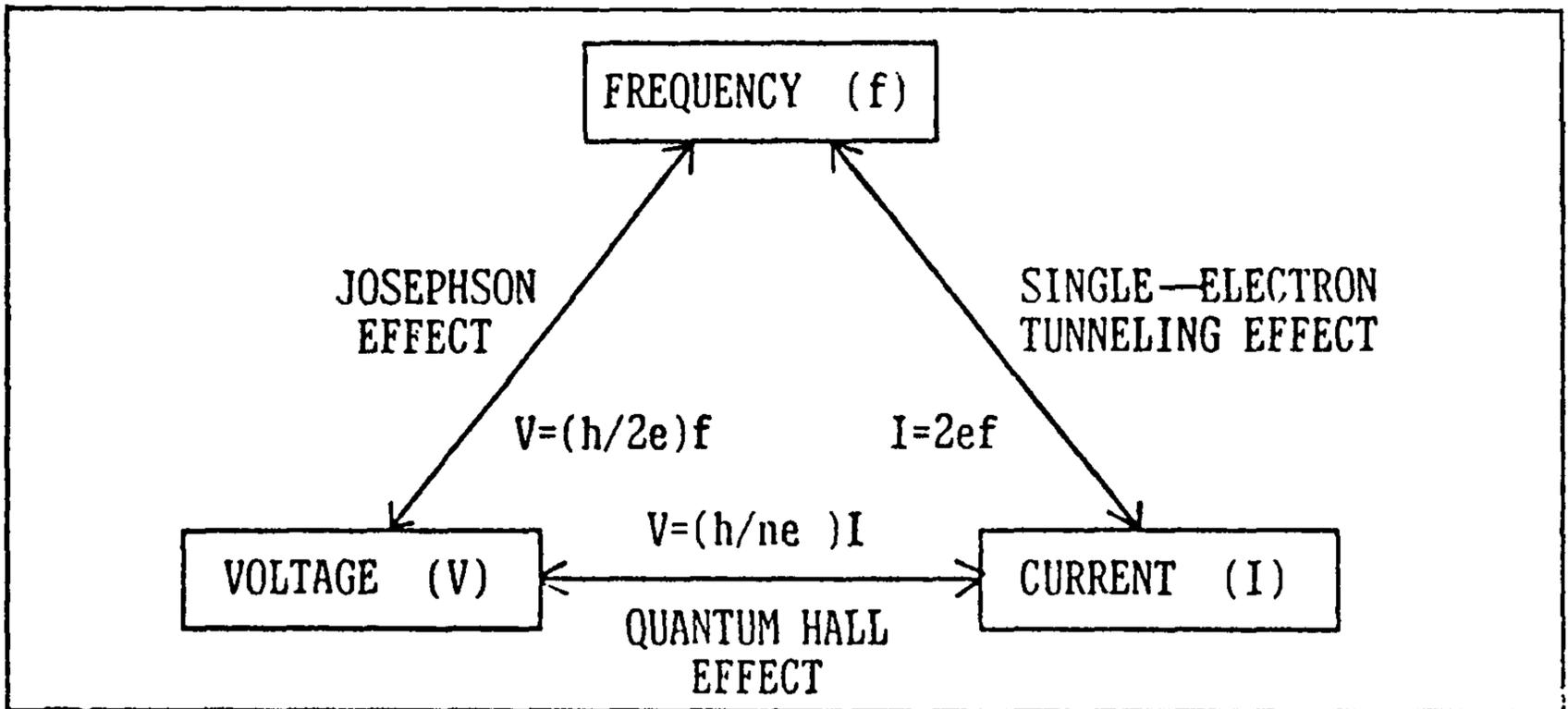


Fig. 1-2-1. A possible metrology triangle for frequency, DC current and DC voltage.

2. 연구개발의 필요성

뇌자도와 같이 극히 작은 자기신호의 검출기술은 첨단 측정기술로서 선진국과 대등한 수준의 기술을 확보하는 것으로서 이 기술을 바탕으로 보다 많은 channel의 system을 개발할 경우 대당 수백만달러가 되는 고부가가치 상품이 될 수 있다. 따라서 선진국을 지향하는 우리로서는 이와같은 고부가가치 상품을 개발하는 것이 절대 필요하며, 이 기술이 일반화되기 전에 충분한 기술축적이 이루어지므로써 기술장벽에 대비하여야 할 것이다. 또한 첨단의 정밀측정 기술은 국가 산업 발전의 토대가 되는 만큼 저온 SQUID나 단전자 효과뿐 아니라 현재 활발한 연구가 진행되고 있는 고온초전도박막을 이용한 SQUID의 응용시스템 개발을 뒷받침하므로써 각종 정밀측정기와 같은 고부가가치 상품 개발에 활용될 수 있으며, 이를 활용한 비파괴검사 기술, 신소재 특성평가 기술 등은 산업적으로뿐만 아니라 기초과학 분야에서도 널리 활용될 수 있으므로, 이를 위해서는 장기적으로 꾸준한 연구가 필요하다.

생체자기 계측용 SQUID system이 의학적으로 활용되기 위해서는 channel 수가 100 여개 정도 되는 multichannel system이 바람직하며, 사용이 용이하고 모든 channel이 신뢰성있게 동작하여야 하므로 적절한 SQUID system을 결정하는 것이 매우 중요하다. SQUID system의 성능은 측정할 수 있는 최소 자장잡음, slew rate 및 bandwidth에 의해 나타내는데 현재 사용중인 저온초전도 Nb/AlO_x/Nb 접합을 이용한 standard (non-hysteretic) DC-SQUID는 그 잡음특성에 있어서는 대부분의 응용에 적용하기에 충분하다고 할 수 있다. 한편 잡음이 심한 환경에서 자장 측정을 할 경우, 예를들면 자기차폐가 안된 공간에서의 생체자기 계측, geophysical 응용이나 재료의 비파괴 평가 등의 경우에는 시스템의 slew rate가 매우 중요하며, SQUID를 RF amplifier로 사용할 경우에는 측정할 수 있는 bandwidth가 중요한 성능지수가 된다. 그러나 현재 세계적으로 많이 사용되고 있는 standard DC-SQUID는 자속-전압 변환계수가 보통 $100 \mu\text{V}/\Phi_0$ ($\Phi_0=2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$: flux quantum) 내외로 비교적 작기 때문에 검출회로에 의한 SQUID의

잡음특성 저하를 막기 위해 임피던스 매칭회로, 자속변조 및 phase sensitive detection 방법이 요구되어 필연적으로 SQUID 구동회로가 복잡해진다. 또한 자속 변조는 채널간 cross-talk을 유발시키며 측정할 수 있는 bandwidth 및 slew rate를 감소시킨다. 따라서 SQUID의 응용분야를 넓히고 시스템을 보다 간단히 하기 위해 현재의 DC-SQUID 구동방식을 간단히 할 필요가 있는데 이를 위해서는 자속-전압 변환계수가 매우 큰 제 2 세대 SQUID의 개발이 요구된다.^[5] 이를 위해 최근 APF를 이용한 DC-SQUID, series array DC-SQUID, (Double) Relaxation Oscillation SQUID 등 몇가지 방식의 SQUID 개념이 도입되었다.

근래 많은 사람들이 채택하기 시작한 APF를 이용한 SQUID는 SQUID의 자속-전압 변환계수를 측정한 후 APF용 저항 및 코일을 추가적으로 연결해야 하는 불편이 있고 APF를 이용하더라도 자속-전압 변환계수를 10 배 이상 증가시키기가 매우 어려우며, 직렬 연결된 SQUID의 경우에는 특성이 거의 같은 다수의(약 100 개 내외) SQUID를 제작하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 냉각시 자속 trapping 문제가 심각하다.

저항-인덕터로 된 shunt 회로를 히스테리시스가 있는 DC-SQUID에 병렬로 연결시키면 relaxation oscillation이 일어나며 전압 펄스가 발생되는데, 이때 시간 평균된 relaxation oscillation SQUID 출력전압은 SQUID loop에 가해지는 자속에 따라 변하며 이를 이용하여 높은 자속-전압 변환계수를 관찰하였다. 그리고 두개의 relaxation oscillation SQUID를 직렬 연결시킨 DROS를 이용하면 더욱 높은 자속-전압 변환계수를 얻을 수 있음이 확인되었다. 그러나 DROS는 두개의 SQUID loop으로 되어 있기 때문에 외부자속이 trap될 확률이 한개의 SQUID loop보다 크므로 SQUID loop의 갯수를 줄여 자속 trap 및 SQUID-검출회로 간의 배선수를 줄일 필요가 있다.

한편 단전자 효과를 이용한 미소접합은 전류표준에 활용될 수 있을 뿐 아니라 전자공학적인 소자로서의 응용 가능성도 있지만, 선진국에서도 최근에야 본격적인 연구가 시작되었다. 따라서 어느정도의 연구경험이 축적되면 그들과의 공동연구를 통한 기술습득도 비교적 쉽게 이루어질 것이므로 지금 연구를 시작할 필요가 있다.

제 3 절 연구의 목표

본 연구의 최종 목표는 실용화에 앞서 의학적 연구용으로 활용될 수 있는 생체 자기 계측용 7 channel system을 개발하고, 100 nm 이하의 미소접합 제작기술을 확보하는데 있다.

제 4 절 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 의학적 응용을 위한 multichannel SQUID system을 개발하기 위한 핵심기술로서 새로운 SQUID의 제작기술과 multichannel system을 이용한 생체 자기 신호 검출기술을 개발한다. 또한 미소접합을 이용한 단전자 효과의 응용에 있어서 핵심기술인 공정기술을 개발한다. 본 연구의 내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

1. 생체자기 계측용 저온초전도 SQUID system 개발

- SQUID 센서의 제작공정 개선
 - Nb/AlO_x/Nb 접합 제작기술의 신뢰성 향상을 위해 에칭방법, 절연방법, Nb 배선 방법 등의 세부기술 개발
- Standard DC SQUID system의 특성조사
- DROS의 설계 · 제작 및 특성
 - 새로운 SQUID 센서인 DROS 설계 및 포토마스크 제작
 - SQUID 제작 및 특성조사
 - 기존의 standard DC SQUID에 비해 자속/전압 변환계수가 약 100 배 정도로 큰 SQUID 센서 제작
- DROS 3 channel system insert 제작
 - DROS를 이용한 axial 형태의 2 차 미분형 gradiometer를 채택

- modular 형태의 3 channel insert 제작
- SQUID controller 제작
 - 최대 4 개의 SQUID 센서를 구동할 수 있는 multichannel SQUID controller를 설계 및 제작
- 성능향상을 위한 새로운 DROS의 설계 · 제작
 - relaxation 주파수를 높여 잡음 특성 개선

2. 미소접합 제작

- 전자빔을 이용한 미소가공 기술 연구
 - 전자빔 리소그래피 전용 주사현미경 설치
 - 전자빔 가속전압의 최적조건 결정
- Aharonov-Bohm 효과 소자 제작 및 특성 조사
 - 가장 간단한 구조의 mesoscopic device 인 Aharonov-Bohm 소자 제작
 - Aharonov-Bohm 소자의 특성조사

제 5 절 연구결과 발표 및 특허

1. 국내 전문 학술지 발표

- (1) 유경화, 박용기, 박종철, “단전자 접합들의 I-V 특성,” 새물리 투고

2. 국제 전문 학술지 발표

- (1) Y.H.Lee, J.M.Kim, H.C.Kwon, Y.K.Park, J.C.Park, M.J.Duuren,

D.J.Adelerhof, J.Flokstra, H.Rogalla, "3-Channel Double Relaxation Oscillation SQUID Magnetometer system with Simple Readout Electronics," submitted to IEEE Trans. Appl. Supercon. 5 (1995)

3. 국내 학술회의 논문집 발표

- (1) Y.H.Lee, J.M.Kim, H.C.Kwon, Y.K.Park, J.C.Park, M.J.Duuren, D.J.Adelerhof, J.Flokstra, H.Rogalla, "Double Relaxation Oscillation SQUID - A future generation SQUID," Proc. of Conference on High Tc Superconductivity-Yongpyung '94 (1994)

참 고 문 헌

- [1] Biomagnetism : Application and Theory, ed. by H. Weinberg, G. Stroink and T. Katila (Pergamon Press Inc., 1984)
- [2] for recent reviews see :Proceedings of the BIOMAG '93 Conference in Vienna(Elservier Science, New York)
- [3] H. R. Zeller and I. Giaever, Phys. Rev. 181, 789 (1969); J. Lambe and R.C. Jaklevic, Phy. Rev. Lett. 22, 1371 (1969).
- [4] for recent reviews see : Single Charge Tunneling, ed. by H. Grabert and M. H. Devoret(Plenum, New York 1992) ; Single Tunneling and Mesoscopic Devices, ed. by H. Koch (Springer, New York 1992).
- [5] D. Drung, IEEE Trans. Appl. Supercon. 4, 121 (1994)

제 2 장 생체자기 계측용 저온초전도 SQUID system 제작

제 1 절 서 설

생체자기신호는 보통 1-100 Hz 영역의 저주파에 걸쳐 발생하며 신호의 크기가 매우 미약하므로 저주파 영역에서 감도가 높은 SQUID 시스템의 개발이 우선적으로 요구된다. 저온초전도체인 Nb을 이용한 Nb/AIO_x/Nb 조셉슨 접합은 현재 개발된 조셉슨 접합 가운데 저주파에서의 excess noise가 가장 작기 때문에 생체자기 계측을 위한 고감도 SQUID에 필수적인 접합재료라고 할 수 있다. 또한 내화금속인 Nb 조셉슨접합은 반복적인 thermal cycling에 강하며 물리적·화학적 안정성이 뛰어나다. 특히 반도체소자 제작기술을 이용한 센서의 집적화가 용이하고 제작상의 재현성이 뛰어나기 때문에 multichannel 시스템에 필요한 다수의 SQUID 제작이 용이한 장점을 가진다.

SQUID의 형태로는 현재 사용되고 있는 standard (non-hysteretic) DC SQUID를 사용할 수도 있지만 matching 회로때문에 센서의 부피가 커지고, 구동회로가 복잡한 단점이 있으므로 이를 개선할 수 있는 새로운 SQUID를 사용하기로 하였다.

히스테리시스가 있는 DC SQUID를 인덕터와 저항으로 된 shunt 회로와 병렬로 연결시키면 relaxation oscillation이 일어나며 이를 이용하면 standard DC SQUID에 비해 자속-전압 변환계수가 약 100배 이상 큰 Double Relaxation Oscillation SQUID(DROS)가 가능하다. 본 연구에서는 히스테리시스 Nb/AIO_x/Nb 접합을 이용하여 DROS를 제작하고 특성을 조사하였다. 특히 DROS에 사용되는 두개의 SQUID중 기준 SQUID를 기준접합으로 대체함으로써 multichannel 시스템에 사용하기에 더욱 적합하도록 하였다.

제 2 절 SQUID 센서의 제작공정 개선

조셉슨접합이 SQUID의 중심요소이지만 실제 다층박막소자 제작시에는 많은 기술적인 문제가 해결되어야 하는데 그 중에서도 신뢰성있는 절연 및 배선 공정확립이 우선적으로 요구된다.

1. Photoresist overhang 구조 실현

다층박막의 step coverage를 좋게하기 위해서는 증착되는 모든 박막이 positive slope을 가져야하는데 이를 위해서는 lift-off 마스크로 사용될 포토레지스트가 overhang 구조를 가져야 한다. 본 실험에서는 포토레지스트를 클로로벤젠에 담금으로서 벤젠에 경화된 표면 부분의 현상액에 녹는 속도를 경화되지 않은 기판쪽 부분에 비해 매우 느리게 함으로서 negative slope을 가지게 했다.^[1] Overhang 구조는 노광조건, softbaking 온도, 클로로벤젠 담금 온도 및 시간, 현상시간등에 의해 달라진다. 이중 노광시간은 충분히 길어야 회절효과에 의해 기판쪽으로 갈수록 노광된 선폭이 커지게 된다. 요구되는 overhang 길이는 스퍼터링 타겟의 크기와 기판-타겟간의 거리에 의해 정해지므로 타겟이 크고 타겟-기판간 거리가 가까운 extended source일때는 overhang 길이가 길어야 한다. 한편 스퍼터링의 경우에는 이온 또는 증착입자에 의한 레지스트 구조의 에칭 또는 변형이 작기 때문에 overhang이 두꺼울 필요는 없다. Softbaking 온도가 낮을수록 overhang 두께는 증가하나 낮은 baking 온도는 레지스트와 기판간의 부착력을 감소시켜 레지스트를 기판으로부터 일어나게 하는데 패턴이 복잡할수록 심해진다. 따라서 전반적으로 패턴 형성의 yield를 높이기 위해서는 softbaking 온도를 너무 낮지 않도록 할 필요가 있다. 그림 2-2-1은 레지스트-기판간의 부착력 실패에 따른 국부적인 패턴손실을 보여주는 사진이다.

한편 벤젠의 온도가 높을수록 그리고 담그는 시간이 길어질수록 overhang의 두께 및 길이는 증가하나 담금시간이 너무 길어지면 레지스트가 polymerization되어

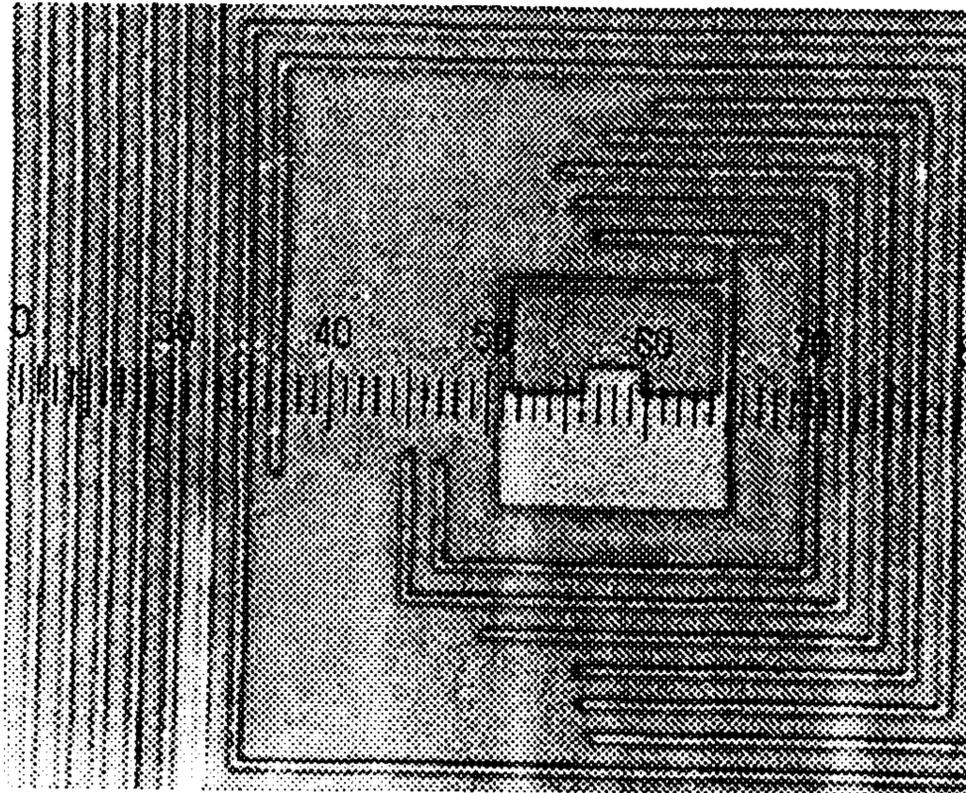


Fig. 2-2-1. Partial loss of pattern due to a adhesion failure between photoresist and substrate.

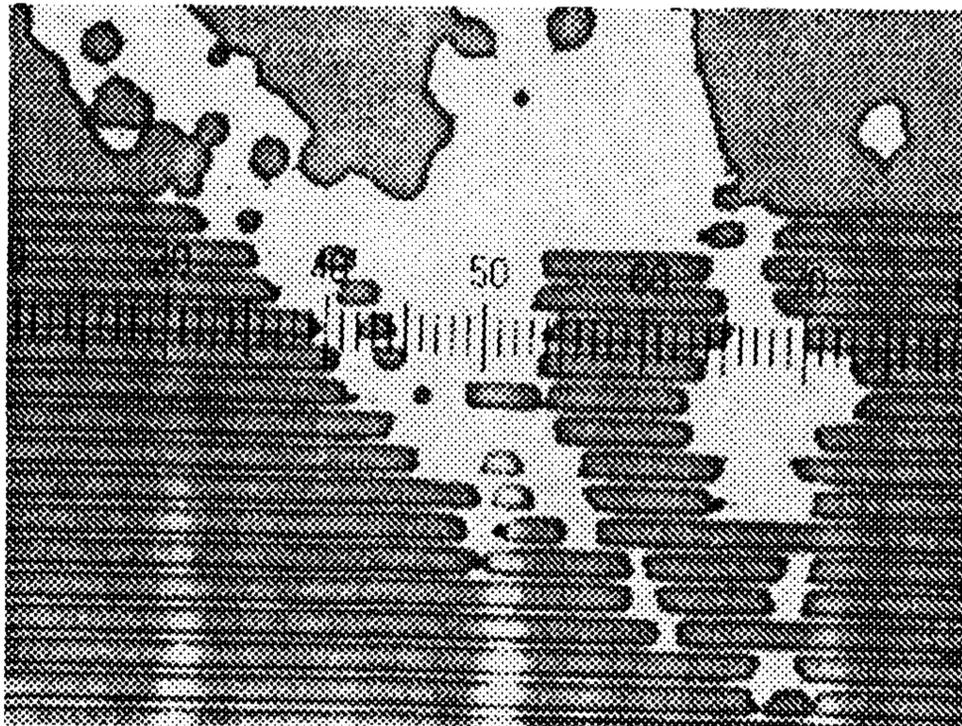


Fig. 2-2-2. Partial development failure of photoresist due to polymerization

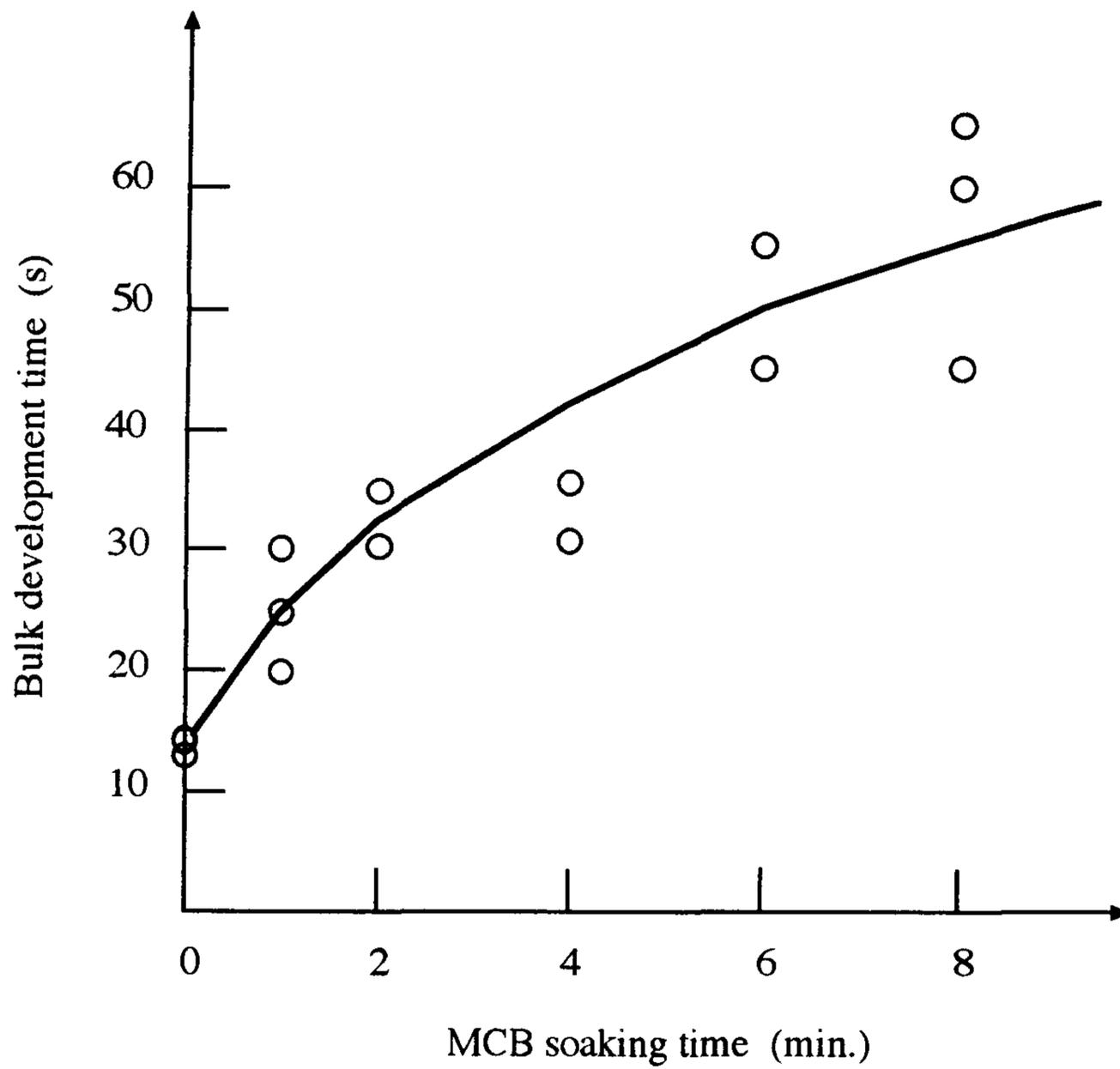
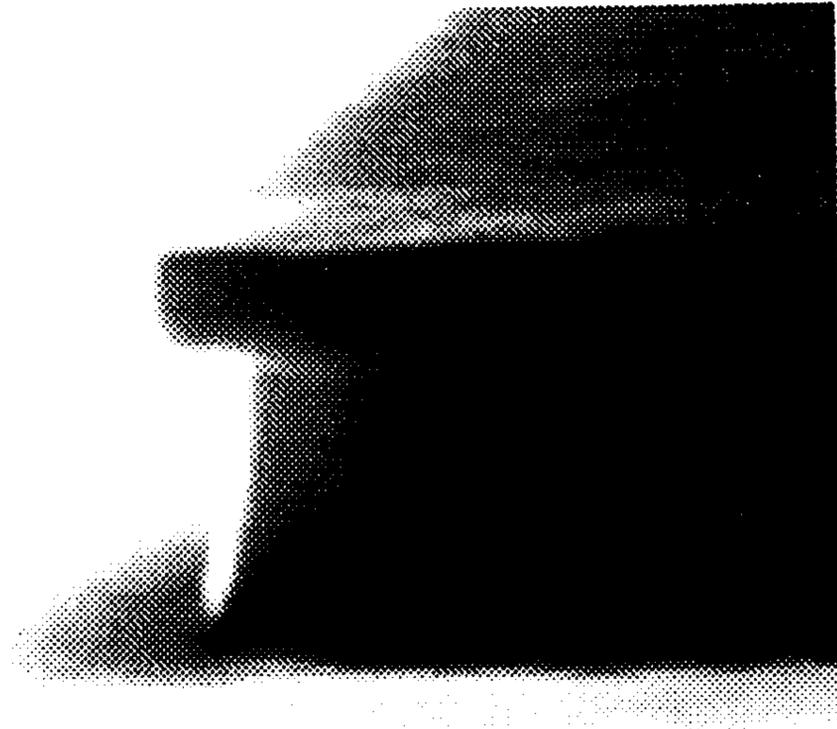
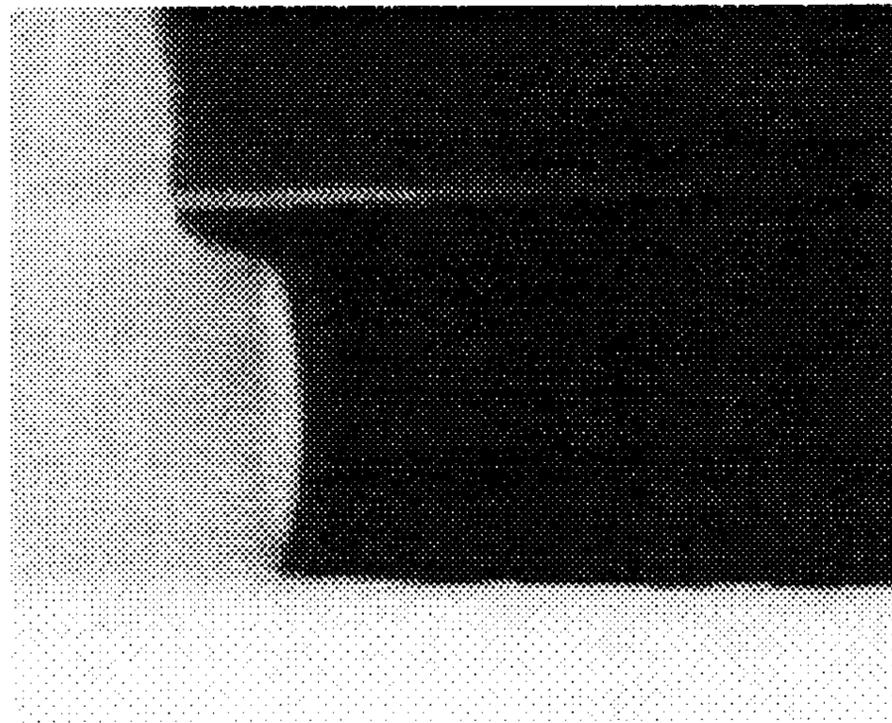


Fig. 2-2-3. Nominal development time versus chlorobenzene soaking time
Solution temperature is 23.5°C. Exposure time is 30s,
developer is 1:5 concentration.



(a)



(b)

Fig. 2-2-4. Overhang structure for two different development times : 120 %(a) and 270 %(b), respectively, of the nominal development time.

국부적으로 현상이 되지 않게 되므로 증착될 박막의 두께 및 증착조건등에 따라 적절한 선택이 필요하다. 그림 2-2-2는 과도한 soaking으로 인해 레지스트의 polymerization에 따른 국부적인 현상 실패의 경우를 보여주는 사진이다.

그림 2-2-3는 AZ1518 레지스트를 90 °C에서 10분간 오븐에서 softbaking 하고, 30초간 노광시킨 후 클로로벤젠 담금시간에 따른 nominal 현상시간이다. 사용한 현상액은 물:AZ351(5:1) 희석액이며 실온은 23.5 °C 이다. 특히 현상속도는 벤젠 담금시의 온도에 매우 민감하기 때문에 온도에 따른 현상속도를 정확히 알아야 한다.

그림 2-2-4는 노광시간 30초, 벤젠 담금을 22 °C에서 9분간 실시한 레지스트의 현상시간에 따른 overhang구조의 변화를 보이는 사진이다. 그림 2-2-4(a)와 (b)는 nominal 현상시간에 비해 각각 120 %와 270 %의 현상에 해당한다. 그림으로 부터 현상시간에 따라 overhang길이는 크게 변하지 않으며 overhang 두께는 현저히 감소하고 레지스트 측벽의 기울기가 더 급격해짐을 알 수 있다. 이러한 구조의 변화를 고려할 때 150~200 % 의 현상시간이 적합하다.

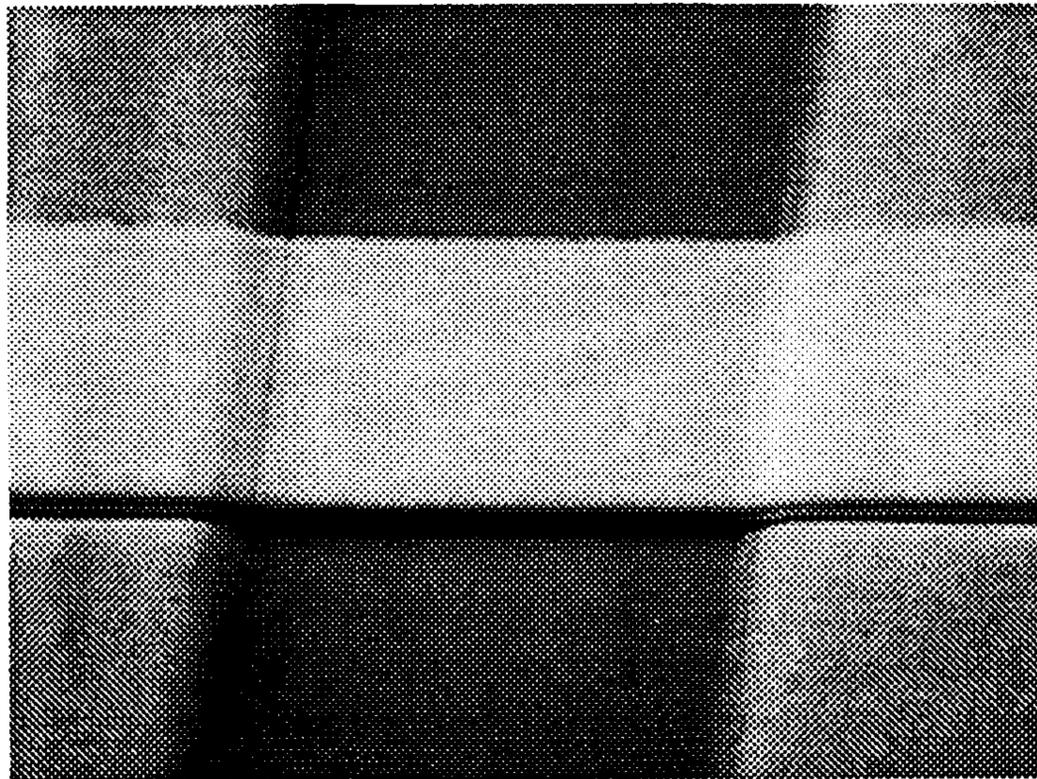


Fig. 2-2-5. Step Coverage of Nb over a patterned structure.

그림 2-2-5는 이러한 overhang 구조를 갖는 포토레지스트를 마스크로 하여 Nb 을 400 nm 증착시키고 표면을 300 nm의 SiO₂ 로 절연시킨 후 다시 400 nm의 Nb으로 배선한 사진으로 하부 Nb 패턴이 positive slope을 가질 경우 배선으로 사용된 상부 Nb의 두께가 두껍지 않아도 step coverage가 매우 양호함을 알 수 있다.

2. 조셉슨 접합

Nb/Al,AlO_x/Nb 접합은 진공도 8×10^{-8} Torr의 진공실내에서 RF-magnetron sputtering으로 증착하였다. PECVD 방법으로 증착된 SiO₂로 표면이 절연된 Si 기판상에 하부전극 Nb을 100 nm/min.의 증착속도로 150 nm 증착시키고, Al을 0.2 nm/s의 속도로 약 8 nm 증착시켰는데 Nb 및 Al 증착시 substrate table의 온도는 chiller로써 0~3 °C로 유지시켰다. 접합장벽을 형성하기 위해 기판온도 40 °C에서 Ar 100 Pa/O₂ 400 Pa 분위기속에서 30분간 Al 표면을 산화시킨 후 상부전극 Nb을 50 nm 증착시킴으로써 접합의 증착은 완료된다. SQUID에 사용되는 접합의 크기는 4 μm x 4 μm 또는 5 μm x 5 μm 로서 Reactive Ion Etching(RIE)방법으로 면적을 정의했다.^[2] 접합면적 defining시 공정이 간단한 양극산화를 사용할 수도 있으나 양극산화방법은 누설전류가 크고 Nb₂O₅의 큰 유전상수로 인해 parasitic capacitance가 커지는 단점이 있다. 에칭은 SF₆ 가스를 사용했으며 유량은 5.2 sccm, 압력 30 mTorr, DC self-bias가 약 -100 V일 때 Nb의 에칭속도는 100 nm/min. 이다. 이때 에칭특성은 비등방적이며 접합 장벽으로 사용되는 AlO_x에 대한 선택성이 매우 우수하기 때문에 얇은 Al막은 아주 훌륭한 에칭 stopper역할을 한다. RIE과정에서 남아있는 Al막은 희석된 현상용액(물:AZ351=25:1)으로 에칭했는데 Al의 에칭속도는 22 °C 에서 0.6 nm/s 이며 레지스트의 현상속도는 무시할 수 있을 정도로 매우 작음을 확인하였다.

3. 절연

RIE 및 Al 에칭후에 self-aligned 방법으로 250 nm SiO₂를 PECVD 방법으로 증착 하였다. PECVD에 의한 증착은 isotropic deposition 이기때문에 pattern이 형성 되어 있는 기판상에 증착할 때 step coverage가 매우 우수하다. 국부적으로 존재하는 pinhole 등에 의해 보통 1 회의 증착으로는 절연이 완전하지 않기 때문에 별도의 포토마스크를 이용하여 2 회의 증착과정을 실시했다.

4. 저항

Pd 박막위에 SiO₂ 막이 증착될 경우 스트레스를 가진 두꺼운 SiO₂ 막이 Pd의 부착력을 나쁘게 할 뿐만아니라 박막이 부분적으로 떨어져 나와 주위의 패턴을 오염시키게 되기 때문에 Pd 위에는 SiO₂가 증착되지 않도록 보호해야 한다. 또한 SQUID특성 평가 후 필요시 Pd의 두께를 변화시켜 저항값을 조절할 수 있도록 하였다.

5. Nb wiring

400 nm의 Nb wiring layer를 증착한 후 Nb 표면 산화방지 및 Nb wire를 이용한 초전도 bonding을 용이하게 하기 위해서 약 5 nm 의 얇은 Pd를 증착하였다.

그림 2-2-6은 전체 제작공정 흐름을 나타내는 그림이다. 그림 2-2-7은 제작된 Nb/AlO_x/Nb 접합의 전류-전압곡선이다. 접합의 특성을 나타내는 quality factor $V_m(\equiv I_c \cdot R(2 \text{ mV}))$ 값이 약 70 mV 내외로서 Nb/AlO_x/Nb 접합에서 발표된 V_m 값들 중에 매우 큰 값을 가지는데 접합의 subgap 누설전류가 매우 적음을 나타낸다. 따라서 개선된 제작방법이 고감도 SQUID 센서 제작에 적용할 수 있음을 확인하였다.

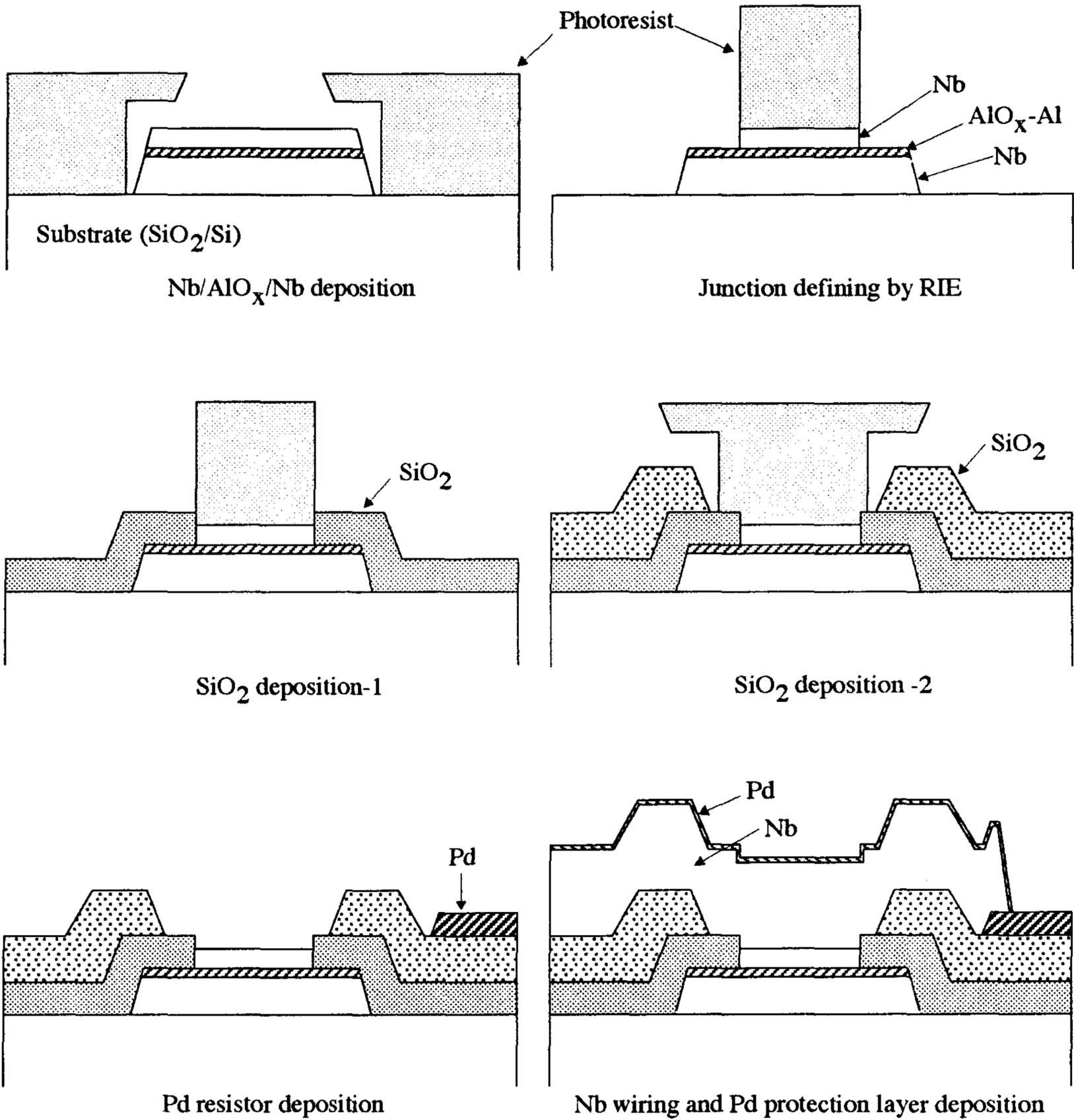
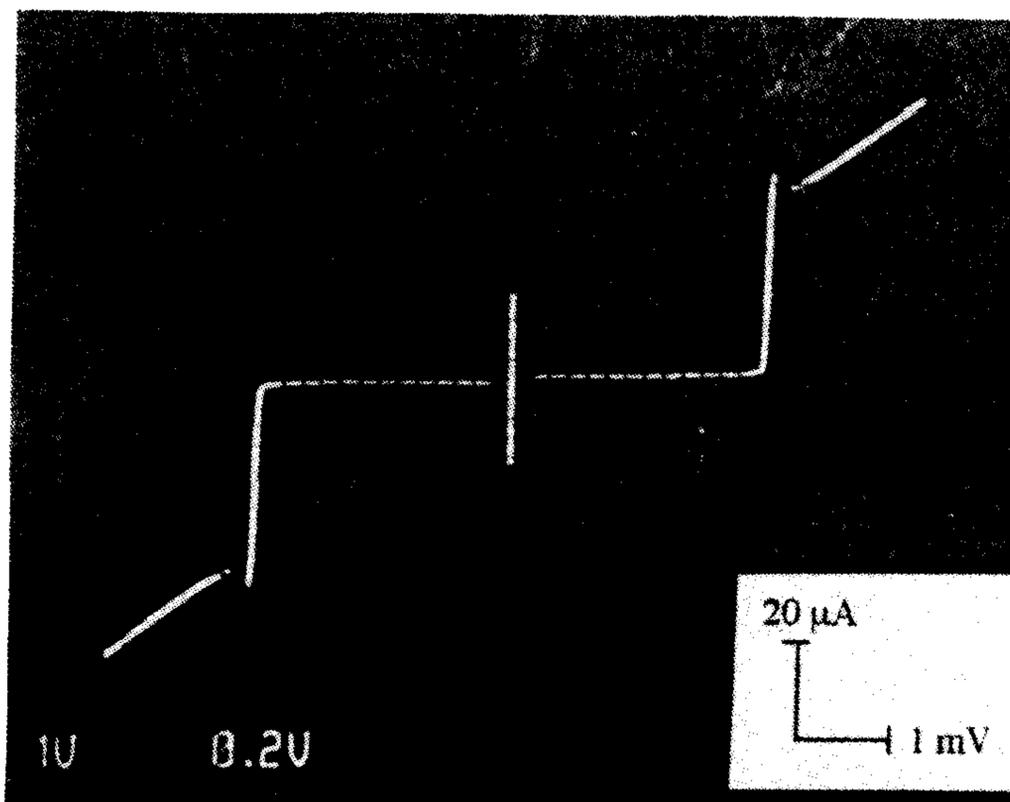
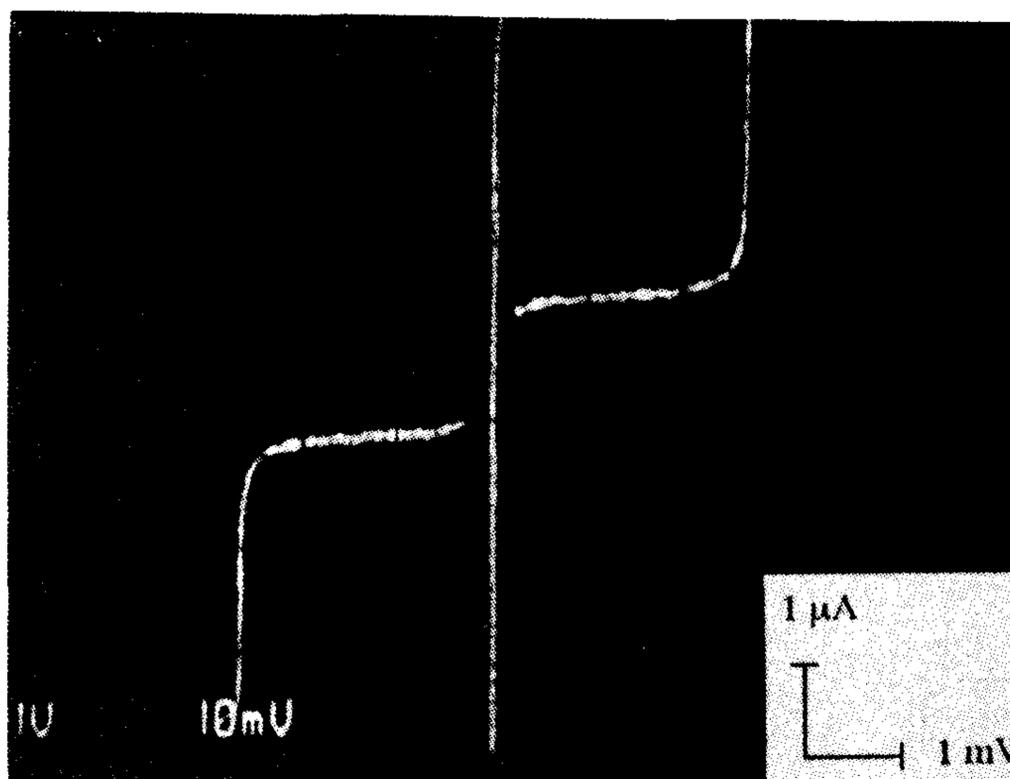


Fig. 2-2-6. Fabrication pocess of Nb/AIO_x/Nb SQUID.



(a)



(b)

Fig. 2-2-7. Current-voltage curve of a Nb/AlO_x/Nb junction at 4.2 K(a) and ten-fold expansion in the current scale(b).

제 3 절 DROS의 설계 · 제작 및 특성

1. DROS의 동작원리

가. 히스테리시스가 있는 SQUID에서의 Relaxation Oscillation

우선 그림 2-3-1(a)와 같은 구조적으로 간단한 Relaxation Oscillation SQUID (ROS)에 대해 알아보자.^[3] 기존의 DC-SQUID와 달리 ROS에는 접합이 히스테리시스를 가지며, 인덕터와 저항으로 구성된 shunt 회로와 병렬로 연결되어 있다. 그림 2-3-1(b)는 SQUID의 전류-전압 곡선으로, 임계전류 $I_c(\Phi)$ 는 외부자속에 대해 주기적인 변화를 하며 V_g 는 갭전압이다. ROS의 동작은 다음 두 식에 의해 설명된다.

$$I_b = I_1(t) + I_2(t) \quad (2-3-1)$$

$$V(I_1(t)) = \frac{dI_2(t)}{dt} + I_2(t)R_{sh} \quad (2-3-2)$$

만약 SQUID의 임계전류보다 큰 ($I_b > I_c(\Phi)$) 일정한 바이어스 전류가 가해지고, $I_b R_{sh}$ 값이 접합의 갭전압보다 작으면 그림 2-3-1(b)에서 화살표 방향과 같은 경로를 반복하는 relaxation oscillation이 일어나는데 이를 4 단계로 나누어 생각해 볼 수 있다.

- i) 상태 1 : SQUID는 zero 전압상태이고 SQUID에 흐르는 전류 I_1 은 그림 2-3-1(c)와 같이 t_0 시간동안 $I_b(1 - \exp^{-t/\tau})$ 와 같은 지수함수로 증가하는데 이때 시정수 τ 는 윗 식(2-3-2)로부터 L_{sh}/R_{sh} 이 된다.
- ii) 상태 2 : SQUID에 흐르는 전류가 SQUID의 임계전류에 도달하는 순간($I_1 = I_c(\Phi)$) SQUID는 전압상태 ($V = V_g$)로 순간적으로 jump한다.
- iii) 상태 3 : SQUID는 갭전압 상태를 유지하며 SQUID에 흐르는 전류 I_1 은 지수함

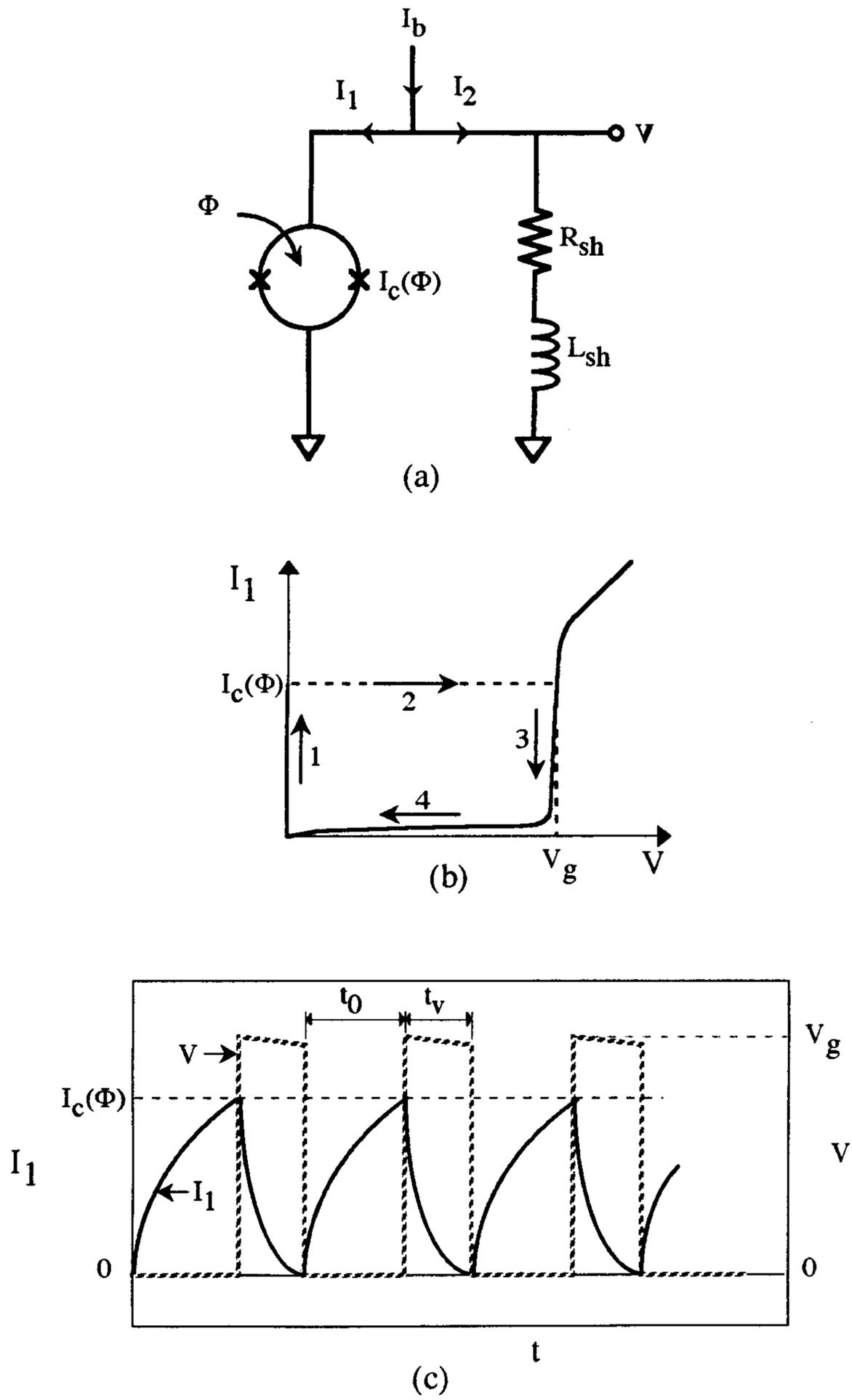


Fig. 2-3-1. Schematic drawing of relaxation oscillation SQUID(a), current-voltage curve of a hysteretic dc SQUID(b) and time evolution of relaxation oscillation(c).

수적으로 감소하고 식(1)로 부터 shunt 회로에 흐르는 전류 I_2 는 증가한다.

iv) 상태 4 : I_1 이 0에 가까워지면 SQUID는 0전압상태로 jump하고 다시 I_1 은 증가하면서 상태 i)로 되돌아간다. 발진이 진행되는 동안 SQUID는 0전압상태와 갭전압 상태를 반복하고 그 결과 그림 2-3-1(c)와 같은 전압 펄스를 발생한다. 이때 펄스의 주파수는 shunt 회로의 시정수 L_{sh}/R_{sh} , I_b , 및 $I_c(\Phi)$ 에 의해 결정되며, 0전압 상태에 머무르는 시간 t_0 와 갭전압 상태에 머무르는 시간 t_V 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$t_0 = \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \ln \frac{I_b}{I_b - I_c(\Phi)} \quad (2-3-3)$$

$$t_V = \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \ln \left(\frac{R_{sh} I_c(\Phi)}{V_g - I_b R_{sh}} + 1 \right) \quad (2-3-4)$$

따라서 relaxation oscillation 주파수 f_{ro} 와 SQUID양단에 걸리는 시간평균된 전압 V_{av} 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$f_{ro} = \frac{1}{t_0 + t_V} \quad (2-3-5)$$

$$V_{av} = \frac{t_V}{t_0 + t_V} V_g \quad (2-3-6)$$

식 (2-3-3)~(2-3-6)으로부터 relaxation 주파수와 평균전압은 $I_c(\Phi)$ 를 통해 외 부자속에 따라 변함을 알 수 있다. 즉, ROS는 자속-전압 변환소자 일뿐만 아니라 자속-주파수 변환소자로도 사용될 수 있음을 보여준다. ROS를 자속-전압 변환소자로 사용할 경우 그 변환계수는 보통 $1 \text{ mV}/\Phi_0$ 이하로서 상온의 DC-amp로 직

접 출력전압을 검출할 경우 amp 잡음이 SQUID 잡음과 비슷한 크기가 되어 잡음 특성이 검출회로의 영향을 받는다. 한편 ROS의 출력 주파수를 검출할 경우에는 잡음특성은 우수하나 고주파 cable로 된 probe가 필요하며 1 GHz 내외의 주파수를 전압으로 변환하는 회로가 필요하기 때문에 현재로서는 multichannel 시스템에 적용하기에는 별로 적합하지 않으나 저온에서 동작하는 주파수-전압 변환회로 및 적분기가 초전도회로 또는 반도체소자로 구성될 수 있으면 완전히 집적화 된 시스템도 가능하다.

나. DROS의 동작원리

DROS에는 히스테리시스가 있는 두개의 SQUID, 즉, 신호 SQUID와 기준 SQUID가 직렬로 연결되어 있으며 인덕터와 저항에 의해 shunt되어 있다(그림 2-3-2(a)).^[4] 한편 출력전압은 기준 SQUID 양단에서 측정한다. 측정하고자 하는 자속은 신호 SQUID에만 전달되며 기준 SQUID에는 기준 SQUID의 임계전류값 (I_{c2})을 적절한 값으로 일정하게 조정하기 위한 DC 자속이 가해진다. 이때 I_{c2} 의 크기는 $I_{c1}(\Phi)$ 의 변조범위내에 있도록 기준 자속을 조정한다. 만약 DC 바이어스 전류가 가해지면 앞에서 본 ROS의 경우와 같이 relaxation oscillation이 일어나는데 두 SQUID중 임계전류가 작은 SQUID가 전압상태로 switching하는데 출력전압은 두 SQUID의 임계전류의 상대적인 크기에 따라 0 또는 전압 상태가 된다. 즉, $I_{c1} < I_{c2}$ 이면 $V = 0$ 이고, $I_{c1} > I_{c2}$ 이면 $V > 0$ 이 된다. 따라서 DROS는 두 SQUID의 임계전류 비교기 역할을 하고 $I_{c1} = I_{c2}$ 일때 두 상태간의 천이는 매우 급격하며 그 결과 $dV/d\Phi$ 가 최대가 된다.

다. 기준 접합을 이용한 DROS

DROS는 두 SQUID의 전류 비교기이며 기준 SQUID는 기준 임계 전류값을 위해 필요하기 때문에 같은 크기의 임계 전류값을 갖는 기준 접합으로 대체할 수 있다. 그림 2-3-2(b)는 기준 SQUID 대신 기준 접합을 사용한 경우로 기준 SQUID를

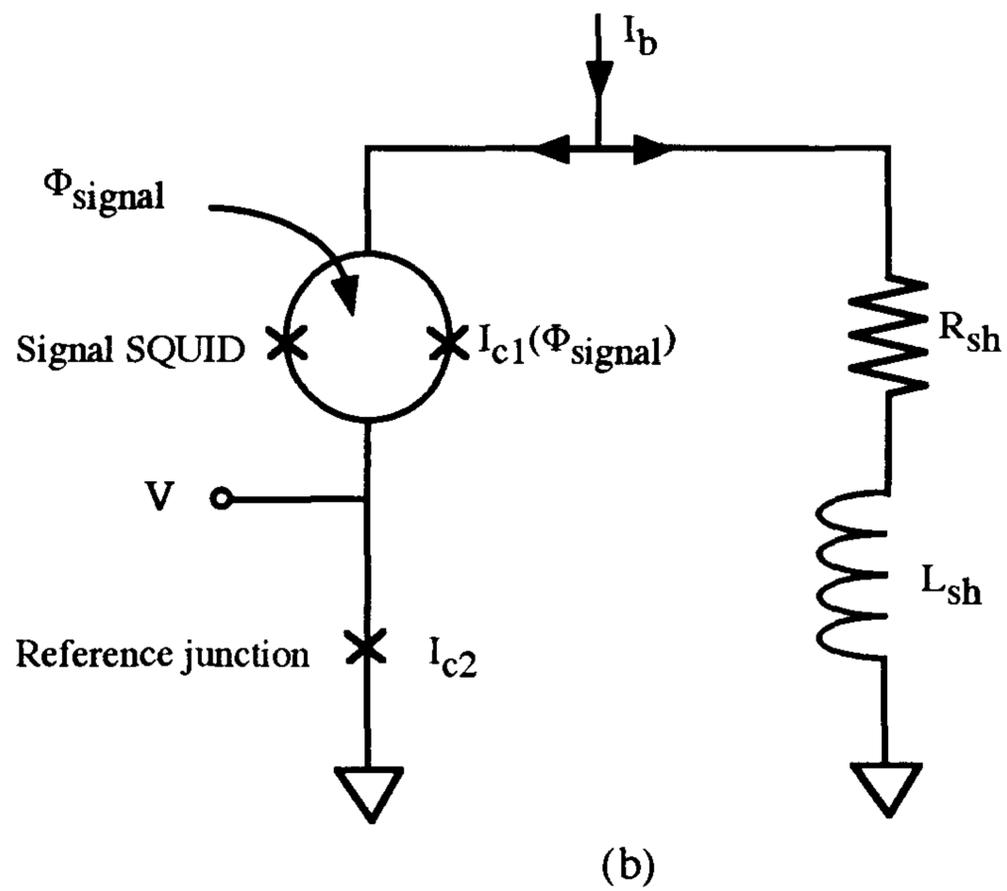
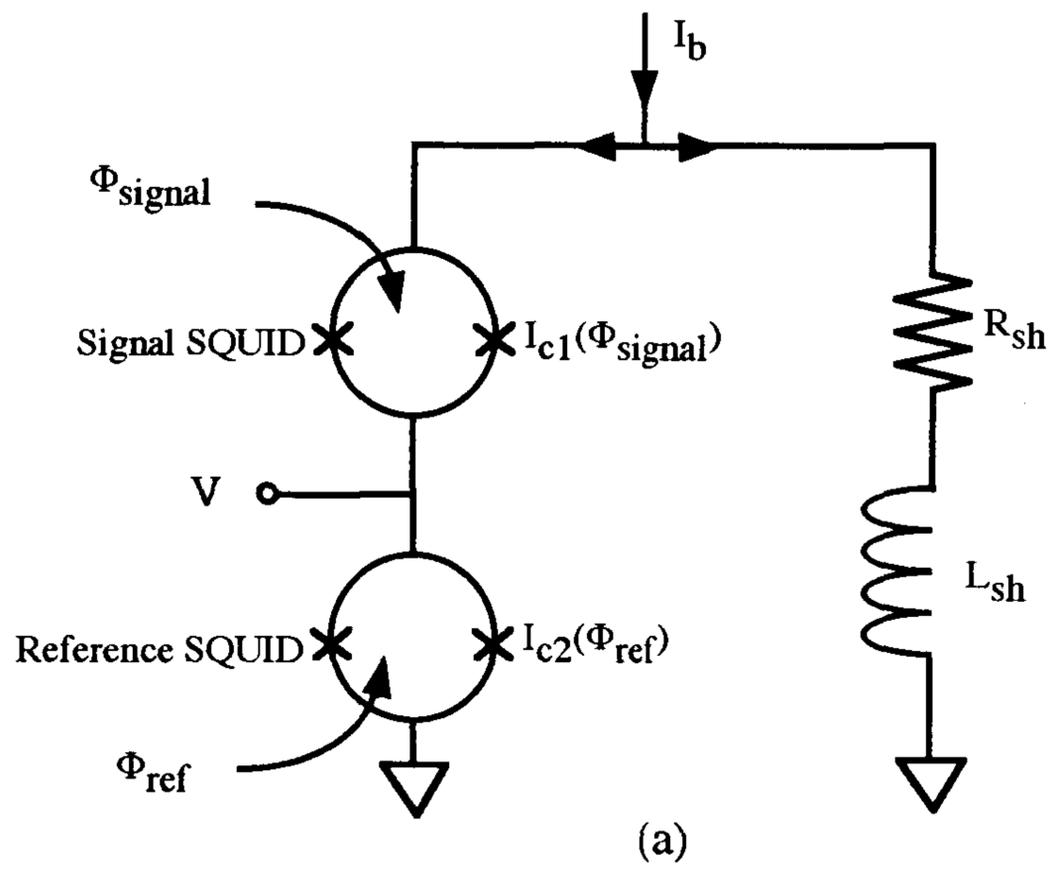


Fig. 2-3-2. Schematic drawing of a DRQS with a reference SQUID(a) and a reference junction(b).

이용하는 경우에 비해 배선수를 2 개 줄일 수 있으므로 multichannel 시스템에서 유리하다. 또한 기존 SQUID를 사용할 경우에 비해 SQUID 갯수가 1 개 줄어들기 때문에 SQUID loop에 외부 자속이 trapping될 확률도 적어진다.

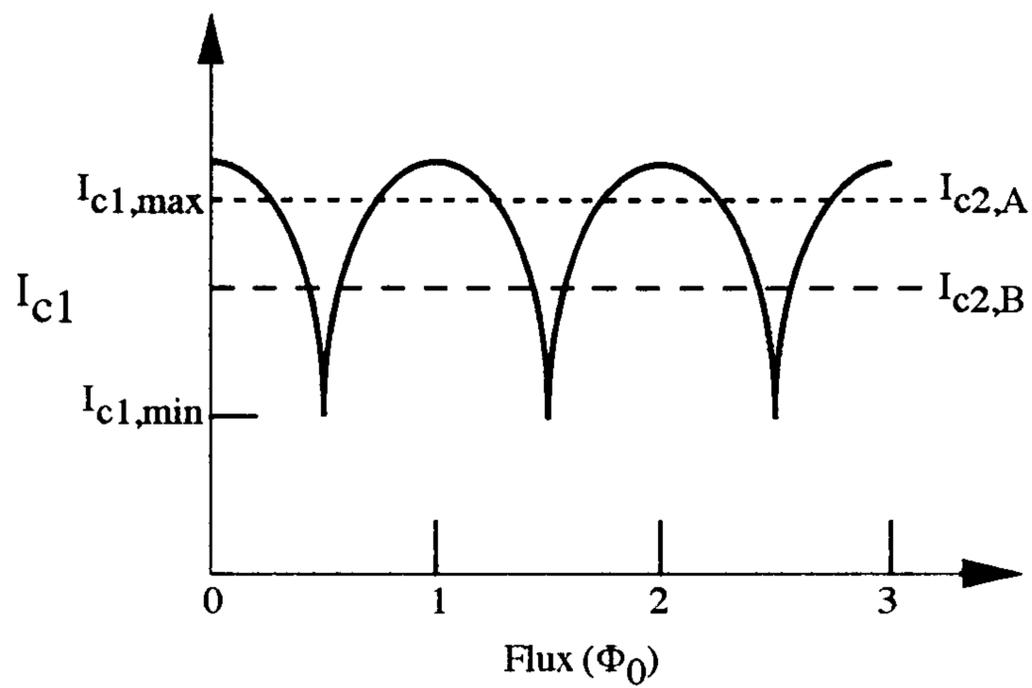
그림 2-3-3(a)는 히스테리시스를 갖는 신호 SQUID의 자속 변화에 따른 임계전류값의 변조곡선으로 $I_c(\Phi)$ 는 $I_{c1,max}$ 와 $I_{c1,min}$ 사이를 주기적으로 반복한다. 여기서 기준 접합의 최적 임계전류값은 신호 SQUID의 screening parameter β ($\equiv L_{SQUID}I_{c1,max}/\Phi_0$)에 의해 정해지는데 신호 SQUID의 임계 전류값의 변조폭이 $I_{c1,max}/(1+\beta)$ 으로 주어지기 때문에 기준접합의 임계전류값은 $I_{c1,max}$ 과 $\{I_{c1,max} - I_{c1,max}/(1+\beta)\}$ 사이에 있어야 한다. 그림 2-3-3(a)에서 크기가 다른 두 가지의 기준 임계전류값 $I_{c2,A}$, $I_{c2,B}$ 에 대해 가능한 자속-전압 곡선을 도식적으로 보인 것이 그림 2-3-3(b)이다.

2. DROS의 설계 및 제작

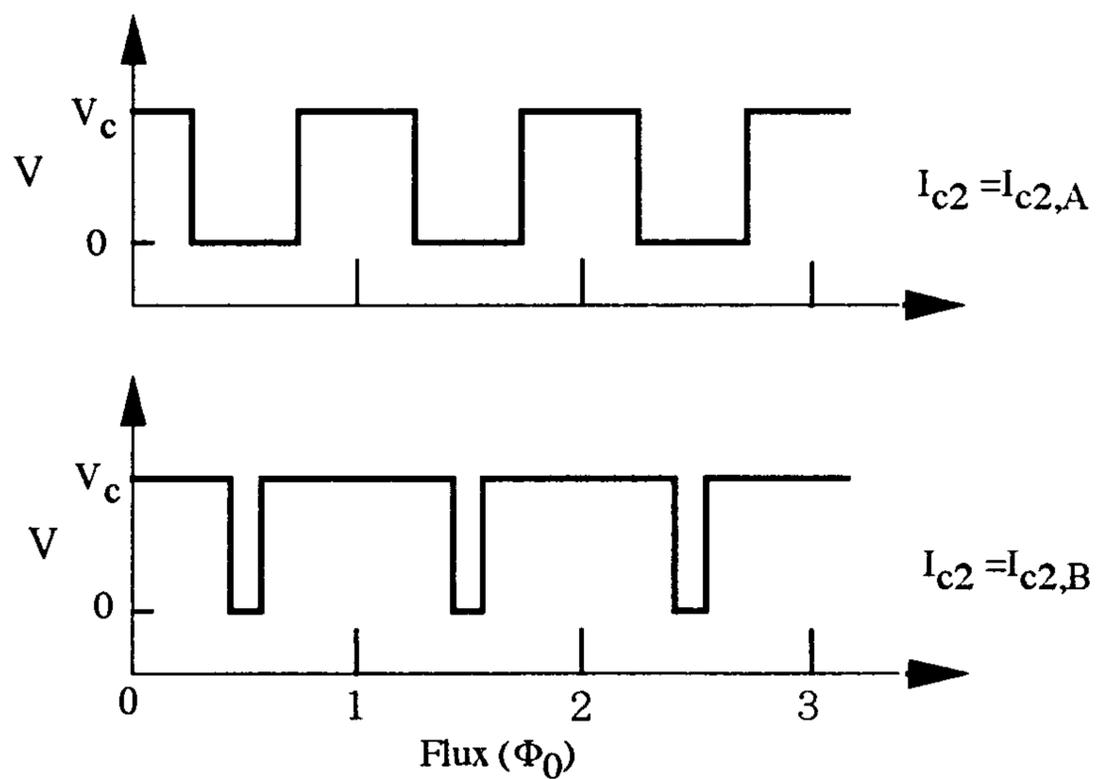
신호 SQUID는 접합이 히스테리시스를 가진 것 외에는 기존의 Ketchen-type DC-SQUID와 똑같은 구조를 하고 있다.^[5] 조셉슨 접합은 stray inductance를 줄이기 위해 SQUID hole 안쪽에 있고 크기가 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 인 히스테리시스를 가지는 Nb/ AlO_x /Nb 접합으로 되어있다. SQUID washer hole의 크기는 $38 \mu\text{m}$ 이며 loop 인덕턴스는 60 pH 이다. 입력코일은 선폭 $4 \mu\text{m}$ 이고 감은 횟수는 50회이며 입력코일의 인덕턴스는 $0.15 \mu\text{H}$ 로 설계되었다. Feedback 코일은 SQUID loop 외곽에 3회의 코일로 되어 있다.

Shunt 회로의 저항은 Pd 박막으로 되어 있으며 인덕터는 Nb 박막으로 parasitic capacitance를 줄이기 위해 평면형 multiturn 구조를 하고 있고, 인덕턴스는 35 nH로 설계되었다. 특히 shunt 회로를 SQUID에 대해 대칭적으로 배치시키므로써 SQUID와의 magnetic coupling을 없앴다.

기준 접합의 크기는 23, 26, $28 \mu\text{m}^2$ 로 설계되었는데 신호 SQUID에 사용된 접합의 전체 크기가 $32 \mu\text{m}^2$ 이므로 기준접합은 신호 SQUID의 최대 임계전류값의



(a)



(b)

Fig. 2-3-3. Critical current modulation of a hysteretic signal SQUID(a) and possible flux-voltage curve for two different values of reference critical currents : $I_{c2,A}$ and $I_{c2,B}$.

72, 81, 88 %에 각각 해당한다. 따라서 신호 SQUID의 screening parameter에 따라 적절한 크기의 기준 접합을 선택할 수 있도록 하였다.

센서는 개선된 제작공정을 이용하여 제작되었으며 DROS의 구조는 그림 2-3-4과 같다.

3. DROS의 특성

제작된 SQUID의 특성을 납으로 된 초전도 차폐내에서 측정하였다. 그림 2-3-5는 전형적인 전류-전압 곡선이다. DROS에서는 출력전압을 기준접합 양단에서 측정하므로 전류-전압 곡선에서 전압상태는 기준접합의 임계전류가 신호 SQUID의 임계전류보다 작은 상태이고 이는 신호 SQUID에 가해지는 자속이 $n\Phi_0$ 근방일 때에 해당된다. 일단 기준접합이 전압상태가 되면 접합의 normal 상태 저항이 보통 50Ω 내외로 크기 때문에 전류는 shunt 회로를 흐르게 된다. 따라서 전류-전압 곡선에서 전압상태의 기울기는 바로 shunt 저항값이 된다. 제작된 DROS의 shunt 저항값은 약 4Ω 으로 shunt 회로의 시정수는 약 8.7 ns가 되며 relaxation 주파수는 110 MHz 내외가 된다.

그림 2-3-6(a) 와 (b)는 크기가 각각 신호 SQUID의 72 %와 81 %에 해당하는 두가지 기준 접합에 있어서 바이어스 전류를 달리하면서 측정한 자속-전압 곡선이다. 여기서 자장은 feedback coil을 통해 가했다. 기준 접합의 크기가 클수록 0 전압 상태의 폭이 상대적으로 넓어짐을 알 수 있다. SQUID 출력전압은 신호 SQUID에 가해지는 자속에 대해 거의 step 함수 처럼 변하고 있음을 알 수 있다. 변조 진폭의 크기 및 step의 기울기는 bias 전류로 조절할 수 있으며 step의 중간 부근에서 최대 기울기가 생기는데 보통 $5 \text{ mV}/\Phi_0$ 의 자속-전압 변환계수가 얻어진다 이는 현재 사용되고 있는 standard dc SQUID에 비해 약 100배 정도 큰 값이다. SQUID loop과 feedback coil 상호 인덕턴스는 128 pH로 측정되었다. 한편 SQUID loop과 입력 코일과의 상호 인덕턴스는 2.1 nH로 측정되었는데 이론적인 값 3.0 nH와 비교하면 coupling 계수는 0.73로 비교적 작은데 이는 SQUID hole의

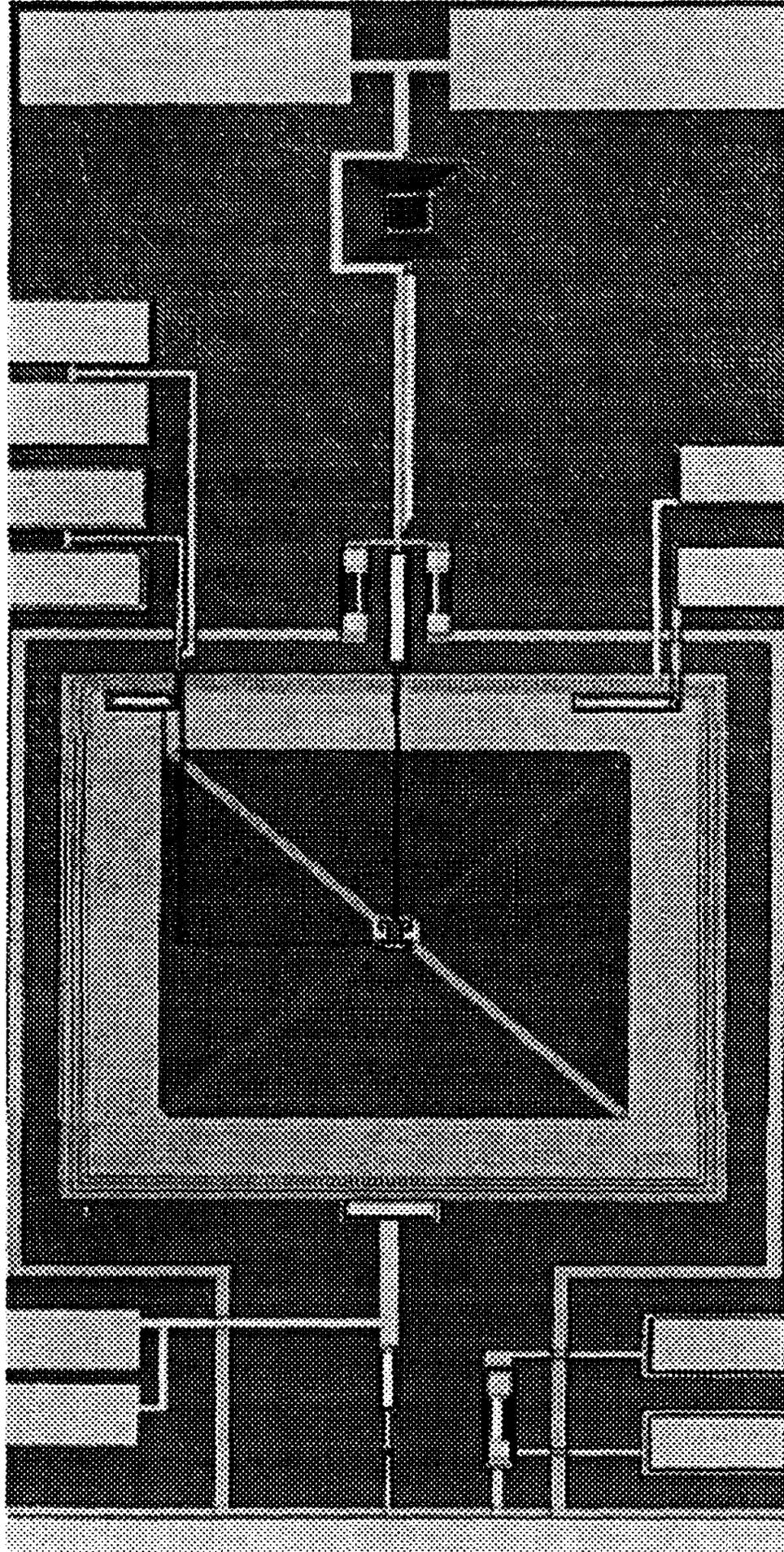


Fig. 2-3-4. Photograph of a DROS.

크기가 SQUID의 외곽치수 및 입력 코일의 감은 수에 비해 작아서 자속이 효과적으로 전달되지 못하기 때문이다.

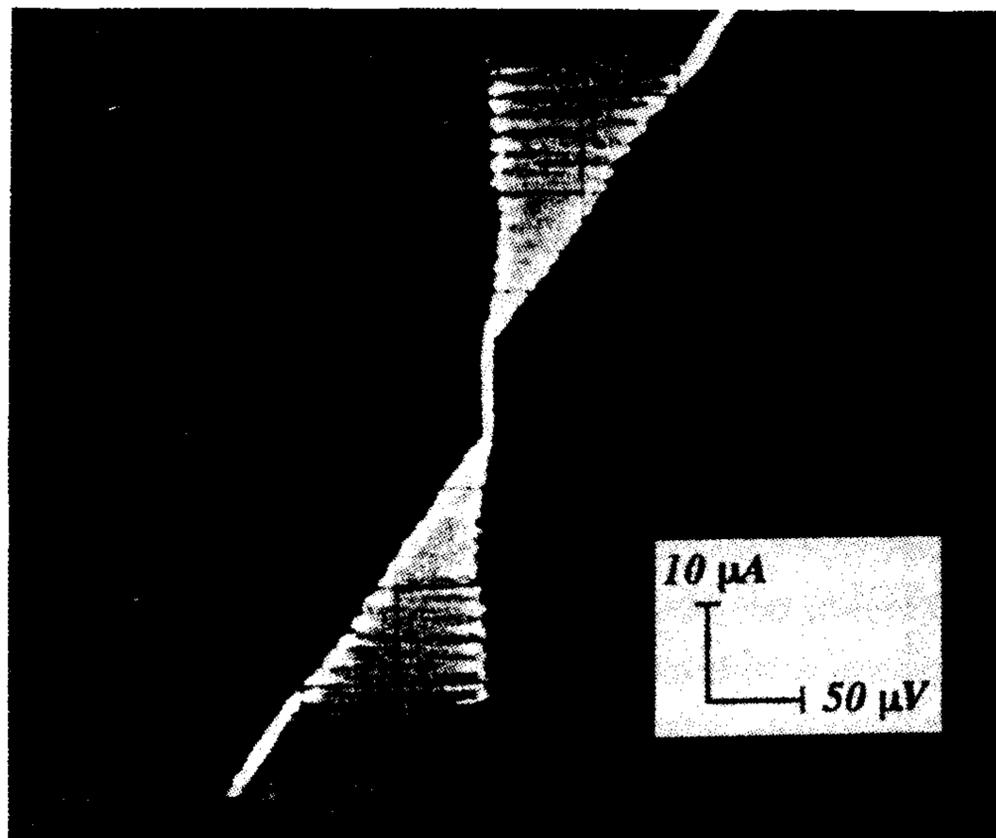


Fig.2-3-5. Current-voltage curve of a DROS.

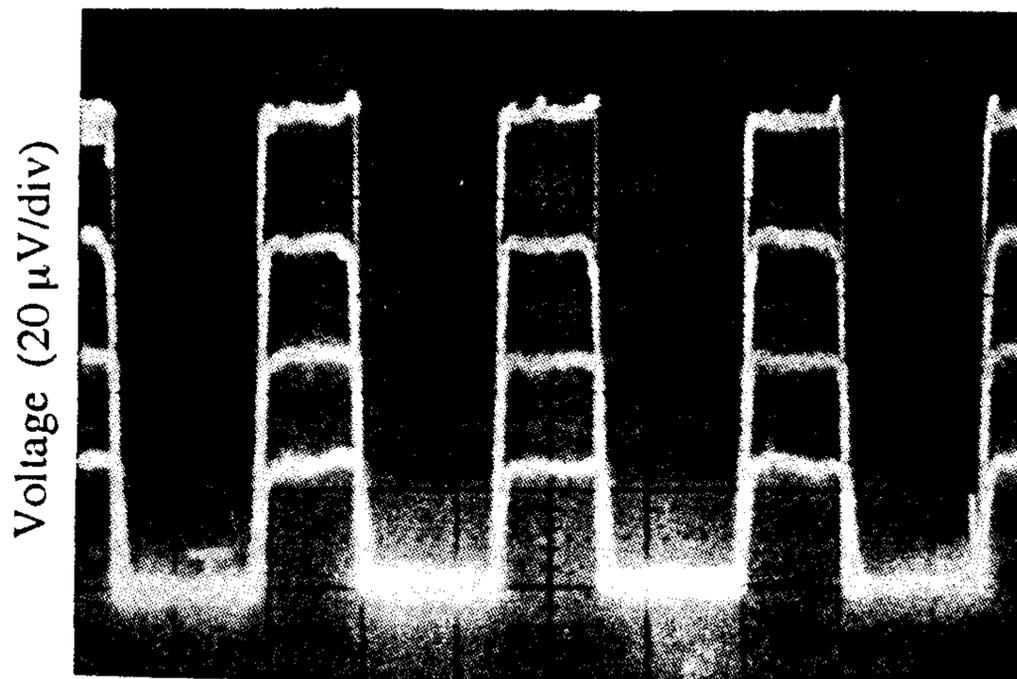
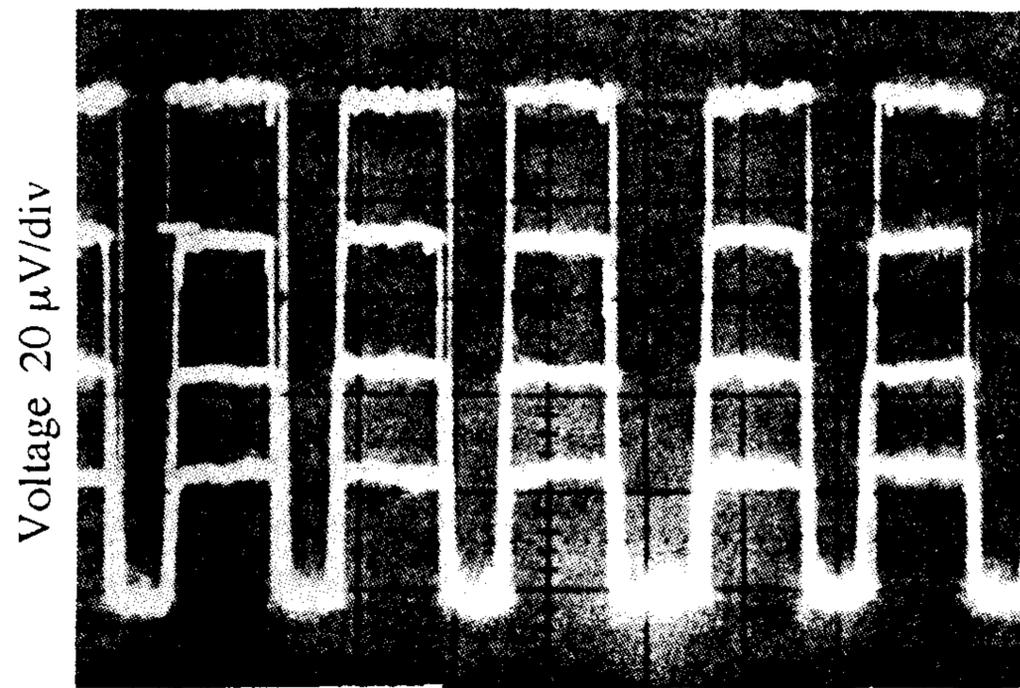


Fig. 2-3-6. Flux-voltage modulation curves for two different reference junction sizes : 72 %(a) and 81 %(b), respectively, of signal SQUID.

제 4 절 DROS 3-channel system insert 제작

1. 초전도 bonding

가. Nb wire annealing

Nb wire는 기계적으로 매우 단단하기 때문에 초음파 bonding 이 가능하도록 wire를 annealing하여 부드럽게 하여야 한다.^[6] 우선 Nb wire 표면의 Formvar 절연층을 황산으로 에칭한다. 약 50 % 내외의 황산을 사용할 경우 실온에서 약 10 분이 소요되는데 에칭이 되면 wire는 금속의 반사율을 띄므로 쉽게 확인할 수 있다.

Wire 를 진공 chamber속에 'V'자 모양으로 설치하고 중앙에 가벼운(0.2 g 내외) 무게를 달아 wire가 떨지 않도록 한다. 절대로 wire가 꼬이거나 뒤틀리지 않도록 주의한다. 1×10^{-6} mbar 내외의 진공도에서 직류 전류 약 0.4 A를 5분 정도 흘려 먼저 outgassing한다. 전류를 끄고 충분히 더 펌핑한 다음 직류전류를 흘려 20 초 동안에 0.5 A에 도달되게 한다. 이때 wire의 온도는 대략 2200 °C이다. Annealing 도중에 wire의 저항값이 변하기 때문에 전류값을 재 조정해야 하며 0.5 A에서 5분 동안 annealing하고 전류를 급히 끈다. Wire가 충분히 식은 후 사용하는데 annealing 후 약 2 주일이 경과하면 bonding이 거의 불가능하기 때문에 가능한 빨리 사용해야 한다. 50 μ m 직경의 Nb wire 저항값은 상온에서 1 m당 86 Ω 이나 0.5 A를 흘렸을 때는 약 5 배 증가하기 때문에 전압이 충분한 current source를 사용해야 한다.

나. Bonding

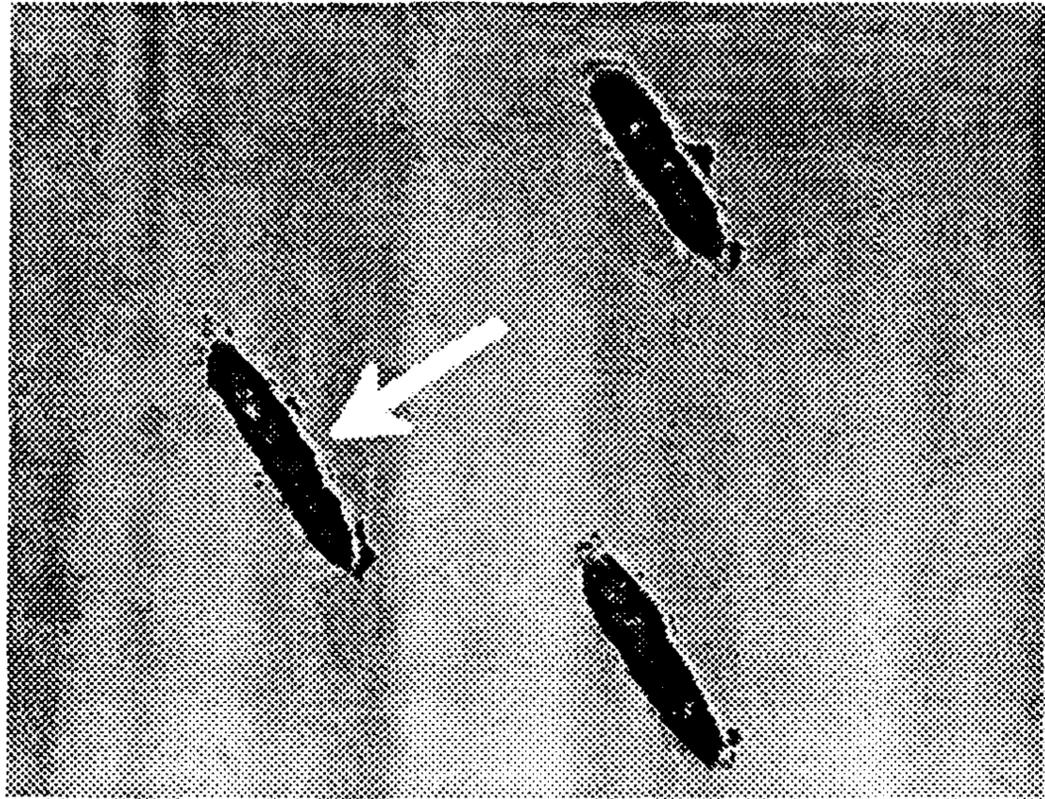
초전도 bonding은 초음파 wedge bonder(Kulicke & Soffa사, Model 4123)를 이용하였다. Hole 지름 50 μ m인 wedge를 사용하여 wedge에 가해지는 무게(또는 force)를 90 g 이상으로 크게 하고, 초음파 출력은 0.8-1.0 W, 시간은 70-100 ms

범위에서 bonding이 가능하다. 보통 annealing된 wire의 끝 부분 10 cm 정도는 충분히 가열되지 않아 bonding이 어렵다. Bonding이 되면 Pd으로 표면이 보호된 Nb input coil pad에서 Nb screw까지 충분한 길이를 뽑아내고 wire를 취급할 때 bonding된 부분에 힘이 가해지지 않도록 알콜에 희석된 GE varnish로 PCB에 wire를 고정한다. 그림 2-4-1(a)는 bonding후 wire를 제거시킨 부분의 현미경 사진이고 그림 2-4-1(b)는 단면을 따라 depth profile을 본 것이다. 그림으로부터 초음파 bonding시 깊이 약 7 μm 까지 기계적 변형이 일어났으며, wire를 기판으로부터 제거했을 때 Nb wire-Nb박막간의 결합이 Si 기판을 떼어 낼 만큼 충분히 강함을 알 수 있다. 일단 Nb wire가 bonding 되면 그 부착력은 같은 기판상에 형성된 Al wire bonding보다 훨씬 강함을 확인했다. Bonding된 부분의 임계전류값을 측정한 결과 최소한 50 mA이상으로 측정회로의 측정범위(50 mA) 때문에 정확한 확인은 할 수 없었으나 50 mA는 검출코일(0.5 μH) - 입력코일(0.5 μH)로 된 flux transformer에 $1.6 \times 10^7 \Phi_0$ 의 자속이 가해졌을 때 흐르는 전류에 해당한다. 이를 검출코일의 자장으로 환산하면 2 G에 해당하는데 지자장의 최대 값이 0.5 G 내외임을 생각하면 초전도 bonding의 임계전류값은 매우 큰 값을 알 수 있고 완전한 초전도 회로를 형성하였다.

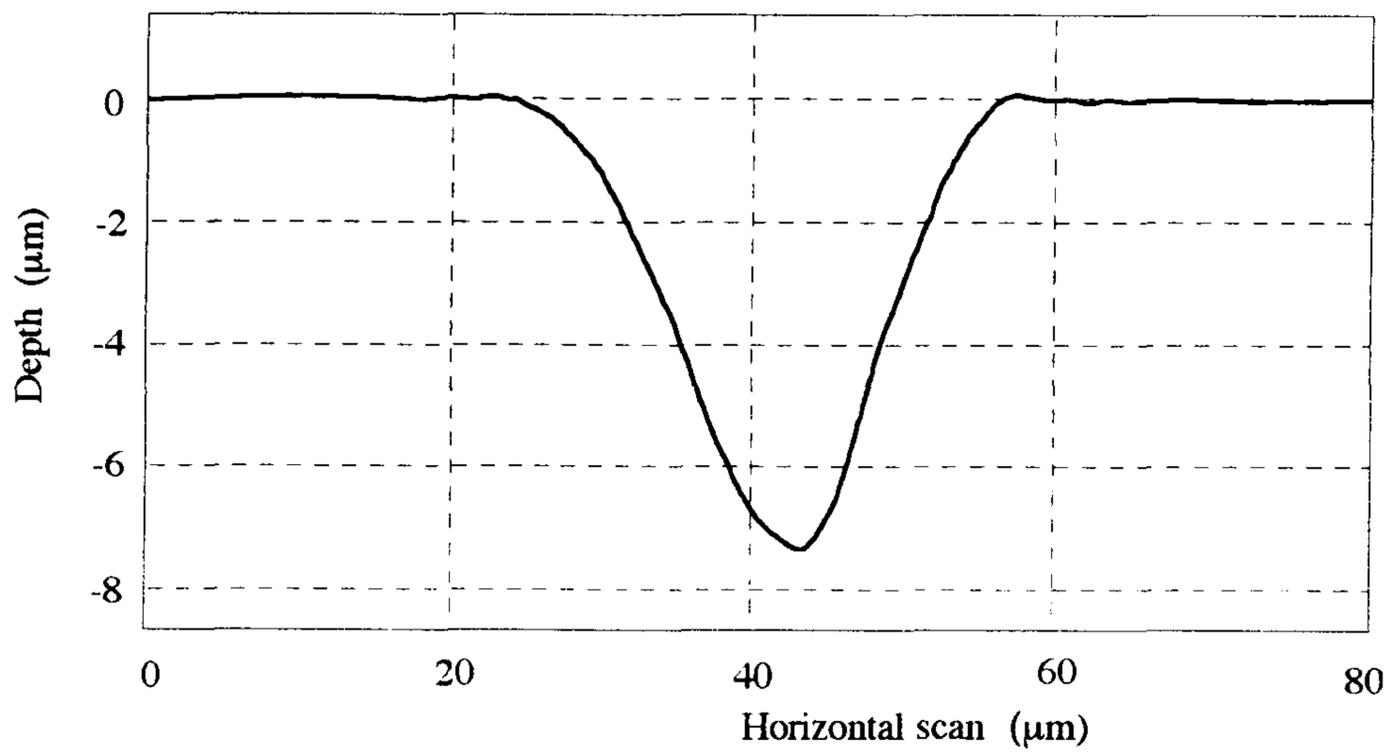
2. 3 channel 자력계 제작

검출코일, 센서 및 head로 구성되어 있는 각각의 probe는 서로 독립적으로 되어 있기 때문에 필요시 전체 insert를 warming-up 시키지 않고도 해당 probe만을 교체할 수 있도록 설계하였다. 센서는 PCB회로에 General Electric varnish로 부착하고, 연결은 Al wire 및 Nb wire를 이용한 초음파 bonding 으로 한다. Nb bonding wire는 검출코일의 Nb wire와 Nb washer를 이용해서 연결했으며 SQUID 및 연결 screw는 Nb block으로 가공된 module 내에 넣었으며 외부에는 Nb tube로 초전도 차폐시켰다.

그림 2-4-2는 Nb module의 구조를 나타낸다. 검출코일은 0.1 mm 선径의 Nb



(a)



(b)

Fig.2-4-1. Photograph of bonded site after removal of Nb wire(a) and depth profiling along the pit hole(b).

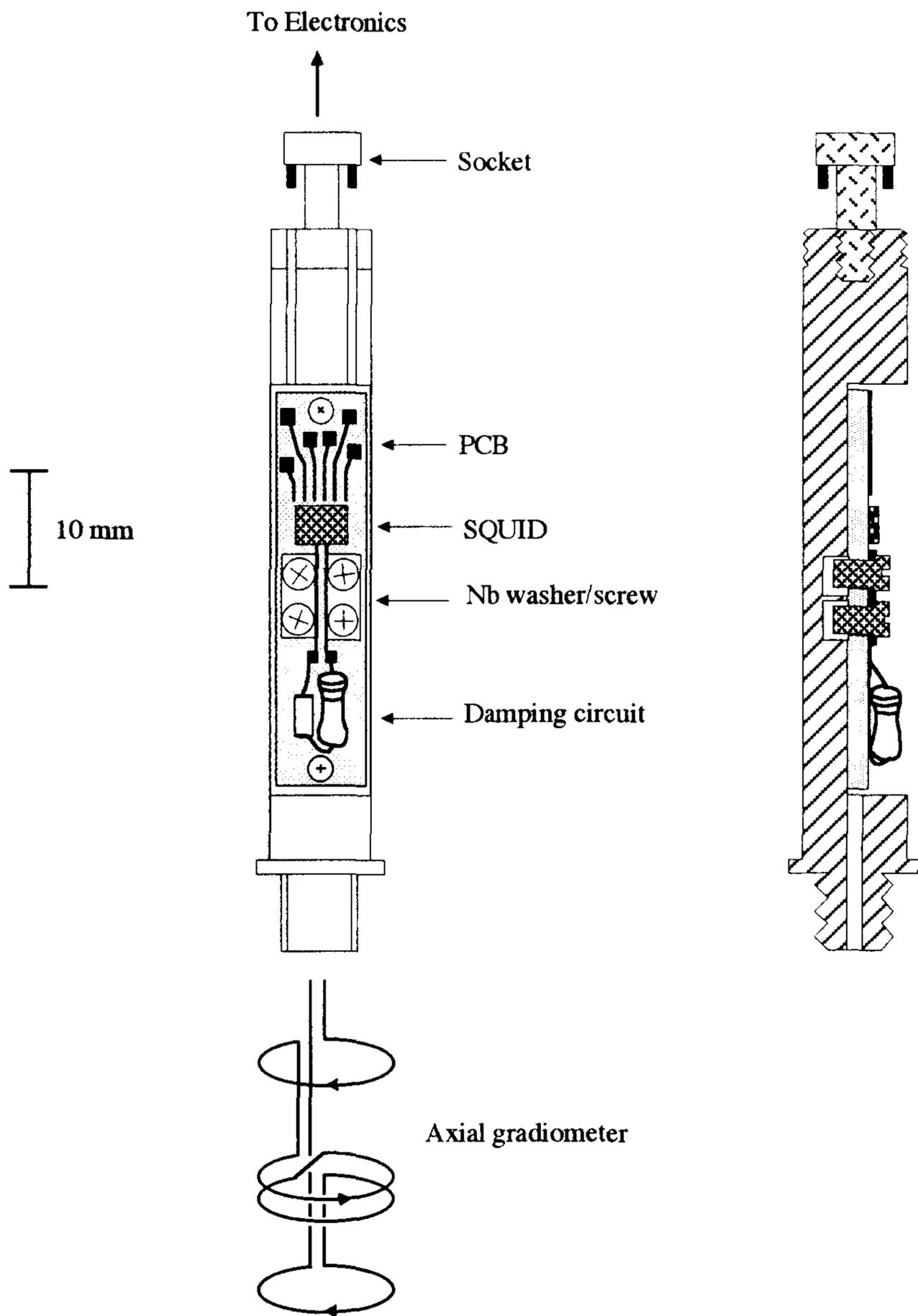


Fig. 2-4-2. Structure of the Nb module.

wire를 Macor ceramic 지지대에 2:4:2 비율로 감은 2차 미분형 gradiometer로서 baseline은 40 mm, 코일 직경은 10 mm이며 인덕턴스는 0.5 μ H이다. 검출코일로부터 고주파 잡음이 SQUID에 전달되지 않도록 하기위해 검출코일과 입력코일 사이에 cut-off 주파수가 약 1 MHz인 RC 저주파 필터(100 Ω , 1.5 nF)를 사용했는데 이는 입력코일의 parasitic capacitance에 의한 공명을 damping하는 역할도 하고 있다. 상온의 구동회로부터 SQUID로 고주파잡음이 유입되는 것을 막기 위하여 head 와 insert 사이에 cut-off 주파수가 1 MHz 인 RLC(150 Ω , 25 μ H, 1 nF) 2차 저주파 필터를 부착시켰다. 연결선은 상온에서 저항 10 Ω /m인 비자성 phosphor bronze 선을 사용했으며 상호간의 magnetic coupling을 막기 위하여 꼬아서 사용했다.

Insert꼭대기에는 pre-amp, integrator, feedback 회로가 포함된 head가 부착되어 있는데 pre-amp부는 SQUID 및 연결선을 포함한 입력부의 임피던스에 의한 영향을 받지 않도록 differential mode로 연결하였다.

한편 검출코일에 자장 B_p 가 가해졌을때 SQUID에 전달되는 자속 Φ_s 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_s = B_p A M_{is} / (L_p + L_i) \quad (2-4-1)$$

여기서 A는 검출코일의 유효 검출면적으로 gradiometer 끝부분의 면적에 감은수를 곱한 것이며, M_{is} 는 SQUID와 입력코일간의 상호 인덕턴스, L_p 와 L_i 는 각각 검출코일과 입력코일의 인덕턴스이다. 따라서 $A=3.14 \text{ cm}^2$, $M_{is}=2.1 \text{ nH}$, $L_p=0.5 \mu\text{H}$, $L_i=0.15 \mu\text{H}$ 를 윗식에 적용시키면 B_p/Φ_s 는 4 nT/ Φ_0 가 된다. 즉 1 Φ_0 의 자속을 SQUID loop에 전달하기 위해 검출코일에 4 nT의 자장이 가해져야 한다. 이는 보통 상용의 SQUID 시스템에서의 전달계수 1 nT/ Φ_0 내외에 비해 큰 값인데 검출코일의 직경을 2 cm 정도로 증가시키면 전달계수를 1 nT/ Φ_0 로 개선시킬 수는 있으나 현재 사용중인 dewar의 tail 내경이 약 3 cm 이므로 3 channel을 만들기 위해서는 검출코일의 크기가 직경 1 cm로 제한될 수 밖에 없다. 차후에 내경이 큰 dewar를 구입하면 전달계수가 더 좋은 검출코일의 제작을 고려할 수 있다.

한편 matching회로 없이 직접 제작한 dc amp, integrator 및 feedback 회로로

구성된 구동회로를 이용하여 SQUID를 납튜브내에서 flux lock loop 동작을 시킨 결과 그림 2-4-3과 같은 자속잡음 스펙트럼을 얻었으며 white 영역에서 $9 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 내외로 측정되었다. DROS 의 주된 잡음원은 열에 의한 임계전류값의 변화인데 임계전류를 비교하는 sampling 주파수, 즉 relaxation oscillation 주파수를 증가시킴으로서 잡음을 줄일 수 있다고 판단된다.^[7] SQUID의 자속잡음이 $9 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 일때 검출코일에서의 유효자장잡음은 $36 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 된다. 그러나 실제로 검출코일을 차폐되지 않은 공간에서 사용할 경우 공간적으로 불균일한 자장이 검출되므로 전체 시스템 잡음은 이보다 더 클 것으로 생각된다. 앞에서 언급한 바와 같이 유효자장잡음도 검출코일의 검출면적을 증가시키면 개선될 수 있다.

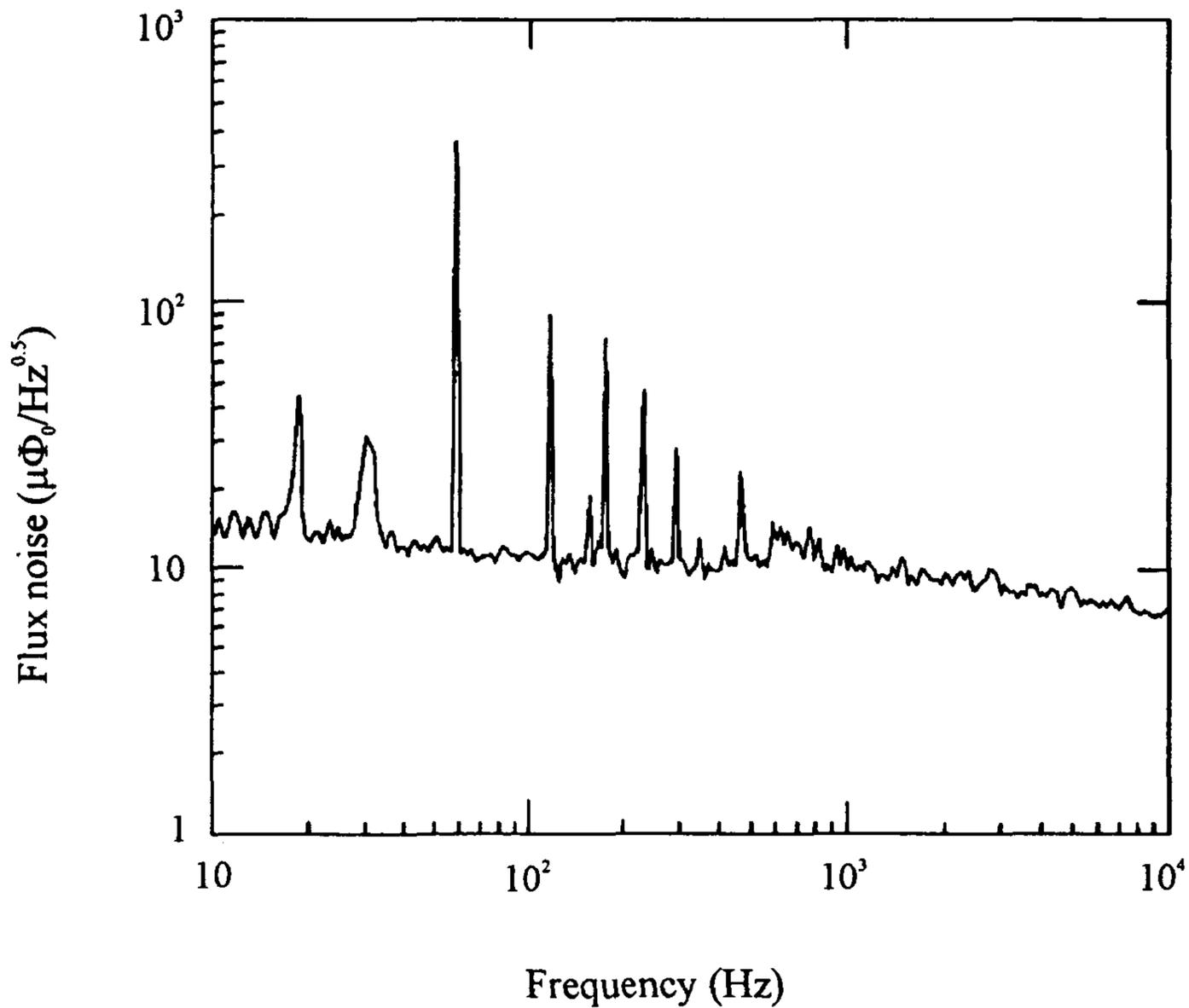


Fig.2-4-3. Flux noise spectrum of DROS in FLL.

제 5 절 SQUID controller 설계 및 제작

1. SQUID readout 시스템

외부의 자속 변화에 따른 SQUID 신호를 측정하기 위하여 SQUID signal control system (SQUID controller)를 설계·제작하였다. SQUID controller는 SQUID에 수십 μA 정도의 작은 전류를 인가했을 때 외부의 자기 신호에 대한 SQUID의 반응을 측정하기 때문에 매우 안정된 특성을 필요로 하며, 아울러 SQUID에서 발생하는 전압을 측정할 때 SQUID 원래의 특성에 영향을 미치지 않도록 외부 잡음의 크기가 약 $2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하를 갖는 증폭기가 필요하다. 그리고 SQUID 신호는 외부 자속의 변화에 대하여 반복되는 신호(swing 전압)로 나타나므로 Flux Locked Loop (FLL)를 써서 외부 자속에 대해 선형화된 출력 특성을 갖도록 한다. 제작된 controller는 probe 및 SQUID head만 교체하면 기존의 DC SQUID와 DROS SQUID를 함께 사용할 수 있도록 하였다.

그림 2-5-1에서 standard SQUID를 이용하여 자속 변화를 측정하기 위한 전체적인 개략도를 보이고 있다. SQUID와 matching 회로가 probe insert에 부착되어 cryostat 안에 위치하며 probe head에는 matching 회로를 지난 신호를 측정하기 위한 인가전류 조절회로, 발진기, 변조회로, 전단증폭기, 2 차 증폭기, 피변조기로 구성된다. Probe head를 지난 신호는 control box로 연결되어 적분기와 되먹임회로를 거쳐 다시 SQUID에 위치한 되먹임 코일로 연결된다. 한편 control box의 출력 신호는 interface card와 A/D card에 연결되어 컴퓨터에서 신호가 처리된다.

그림 2-5-2에는 DROS SQUID를 이용하여 자속 변화를 측정하기 위한 전체적인 개략도를 보이고 있다. SQUID는 matching 회로없이 probe insert 에 부착되어 cryostat 안에 위치하며 probe head에는 인가전류 조절회로, 전단증폭기, 2 차 증폭기, offset 조절기로 구성된다. Probe head를 지난 신호는 DC SQUID와 같은 방식으로 control box로 연결되어 적분기와 되먹임회로를 거쳐 다시 SQUID에 위치한 되먹임 코일로 연결된다. 한편 control box의 출력 신호는 interface card와 A/D

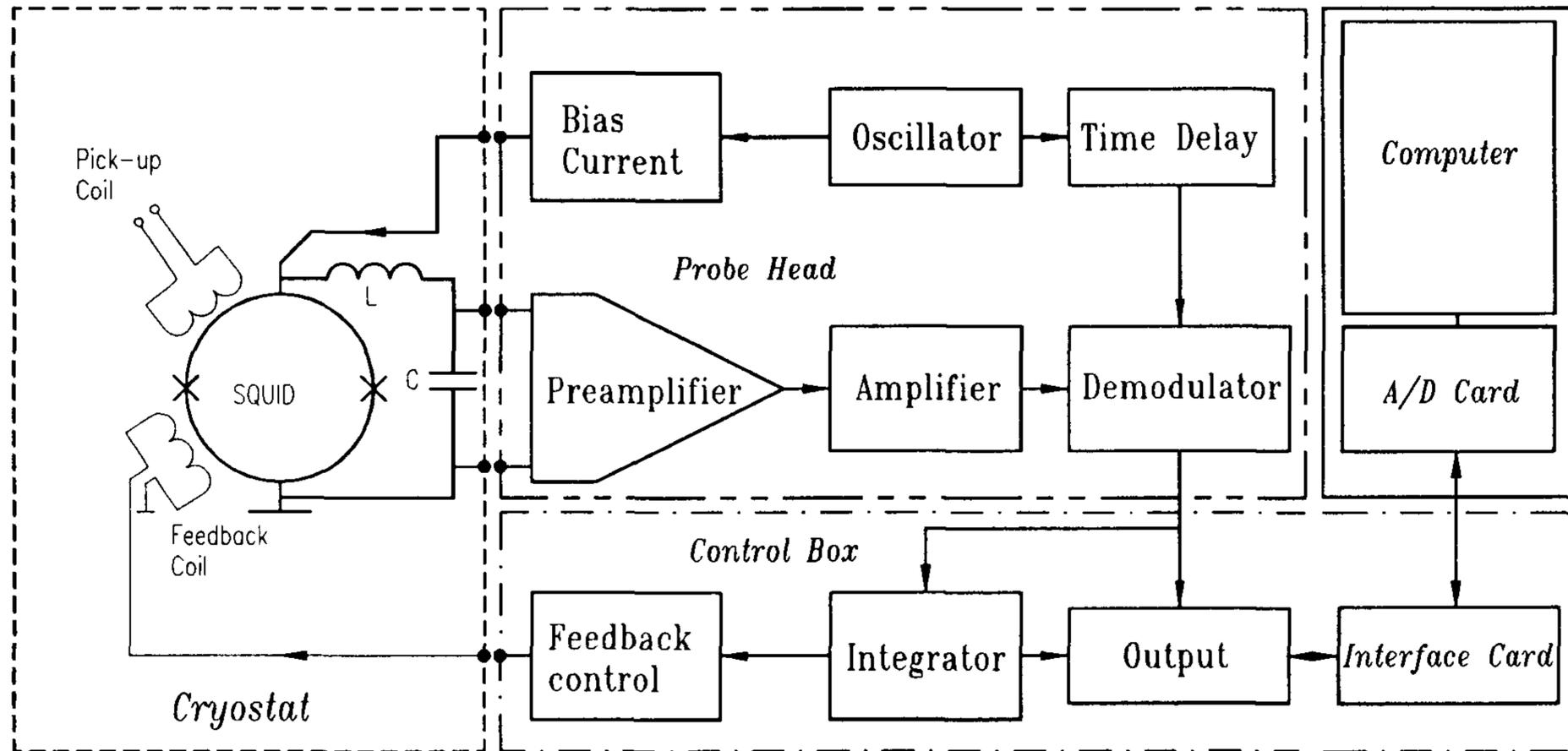


Fig. 2-5-1. Block diagram of standard DC SQUID controller.

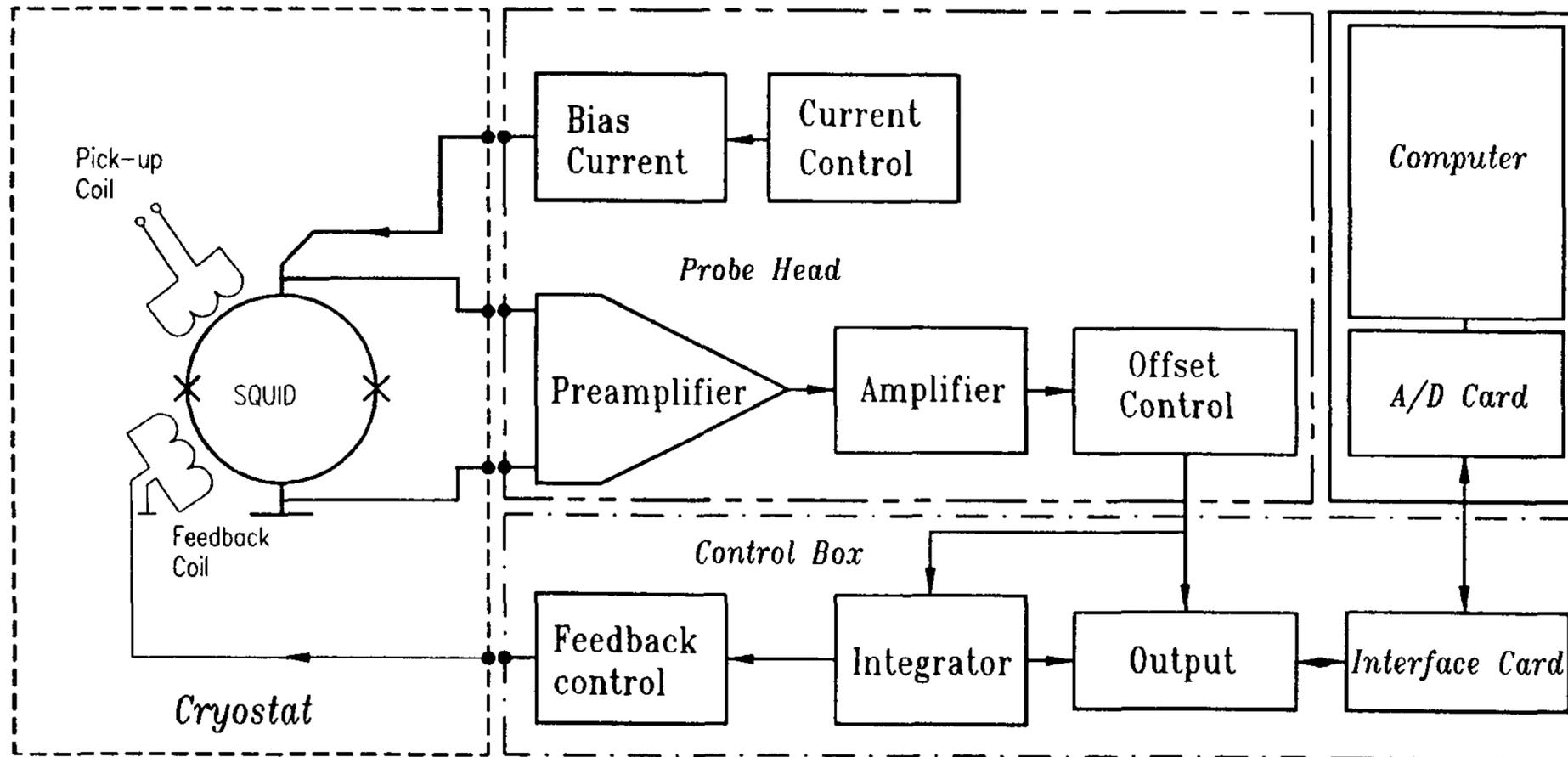


Fig. 2-5-2. Block diagram of DROS SQUID controller.

card에 연결되어 컴퓨터에서 신호가 처리되거나 control box의 출력 BNC를 통하여 나타난다. DROS SQUID controller는 표준형 SQUID controller보다 간단한 회로를 가지게 되므로 생체자기 측정용 multichannel system을 구성할 경우에는 매우 유리하다.

본 절에서는 SQUID controller의 중요 부분인 head와 control box로 나누어서 회로의 구성과 전체 시스템의 운용에 대하여 기술하였다.

2. Probe head

가. DC SQUID head

DC SQUID 신호를 측정하기 위하여 변조된 인가전류원과 조화회로를 이용하여 신호를 검출하며 그림 2-5-3에서 head 안의 회로를 보이고 있다.

발전기에서 30 - 80 kHz의 구형파가 발전하며 이 신호는 안정된 변조 전류원으로 변형되어 인가전류 조절회로를 통하여 SQUID에 전류원으로 인가된다. 인가전류는 control box의 조절기를 써서 조절할 수 있다.

SQUID 출력신호는 matching 회로를 거쳐 전단증폭기에서 증폭되고, 이 신호는 2 차 증폭기를 이용하여 피변조하기에 알맞은 신호로 조절된다. 전단증폭기의 잡음 특성에 의해 SQUID 시스템의 잡음이 결정될 수 있으므로 되도록이면 낮은 잡음을 갖는 것을 선택할 필요가 있으며 여기에서는 matching 회로를 이용하므로 큰 임피던스를 갖는 FET(Field Effect Transistor)를 쓴 전단증폭기를 선택하였다. 그림 2-5-3에서 전단증폭기의 전압잡음은 50 kHz에서 $2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이고 전류잡음은 $7 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 값을 갖는다.

증폭된 신호는 피변조기에서 원래의 신호로 다시 바꾸어 SQUID에 인가된 외부 자속의 변화에 따른 신호를 검출한다. 이때의 신호는 되먹임 회로를 거치지 않으므로 일반적으로 외부의 자속에 대하여 반복된 신호 즉 swing 전압으로 검출된다. 피변조기를 통과한 신호는 control box로 전달되어 반복된 신호를 외부 자속의 변

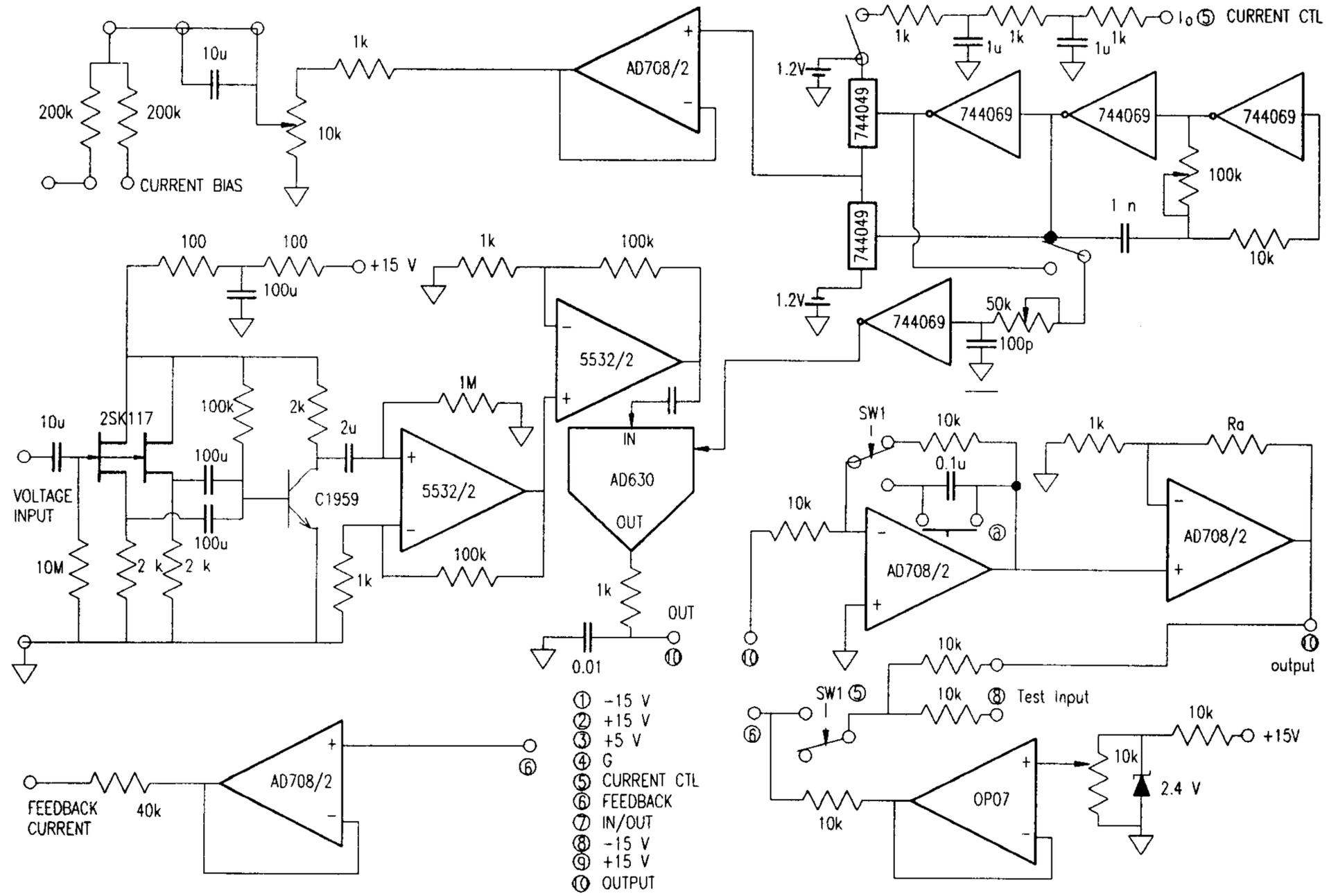


Fig. 2-5-3. Simplified circuit of standard type SQUID head circuit.

화에 따라 선형화된 값을 얻기 위하여 되먹임회로를 구성한다.

Controller는 4 개의 SQUID 신호를 동시에 처리하도록 하였으므로 4 개의 head 가 필요하게 된다.

나. DROS SQUID head

DROS SQUID의 신호를 검출하기 위하여 dc 전류원과 SQUID 전압을 측정할 수 있는 전단증폭기가 필요하며, 그림 2-5-4에서 이를 위한 간단한 회로를 보이고 있다.

전류인가회로는 높은 출력 임피던스를 가지도록 FET형 OP amp를 이용한 되 먹임회로를 구성하여 측정 소자의 저항 변화에 대하여 전류의 변화가 최소화되도록 하였으며, 인가전류는 control box의 조절기를 써서 최적의 전류로 조절할 수 있다.

전단증폭기는 세 개의 OP 27 를 조합하여 Common-Mode Instrumentation Amplifier를 구성하여 안정된 전압을 측정할 수 있게 하였으며 전압잡음은 DC - 1 kHz 사이에서 약 $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 나타내고 전단증폭기 및 증폭기를 거친 신호는 약 1000 배의 증폭율을 가지며 증폭기를 통하여 발생하는 offset을 없애기 위하여 offset 조절기를 연결하였다. Offset 조절기를 통과한 신호는 control box로 전달되어 반복된 신호를 외부자속의 변화에 따라 선형화된 값을 얻기 위하여 되먹임회로를 구성한다.

Controller는 4 개의 SQUID 신호를 동시에 처리하도록 하였으므로 4 개의 head 가 필요하게 된다.

다. Head box

SQUID 신호 검출회로중에서 head 부분, 특히 전단증폭기에서의 잡음 특성이 전체 회로의 잡음 특성을 결정하므로 head 부분을 알루미늄 블럭으로 된 상자내에 밀폐시켜 고주파 잡음의 영향을 줄였고 head를 probe의 끝부분에 설치하므로써

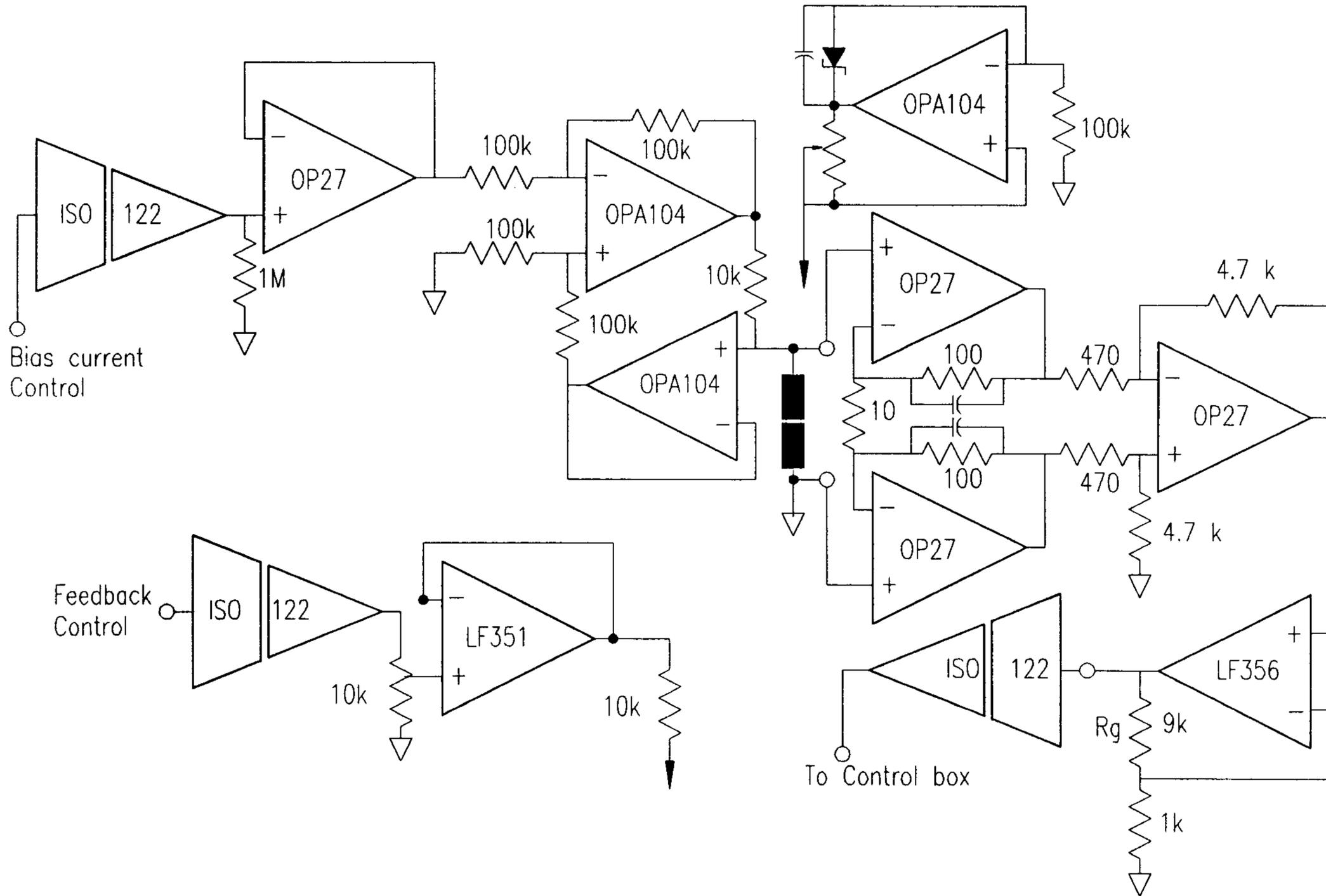


Fig. 2-5-4. Simplified circuit of DROS type SQUID head circuit.

SQUID 출력신호가 잡음에 노출되는 거리를 최소화하였다. 그림 2-5-5 에서 제작된 head box의 크기를 보이고 있으며 단위는 mm이다. Head는 probe에 직접 부착할수 있도록 하였으며 필요한 경우 다른 head와 쉽게 교체할 수 있도록 하였다. Head 안에 위치한 PCB 기판의 각 연결 단자는 그림 2-5-6에서 보이고 있으며 외부의 연결부는 그림 2-5-7에서 보이고 있다. 소형 10 pin 커넥터는 SQUID 신호 처리용으로 이용되며 두 개의 4 pin 커넥터 중 위 부분은 I-V 측정용, 아래는 시험용 자속 발생을 위한 전류 입력단자로 쓸 수 있다.

3. Control box

변화하는 외부 자속에 대하여 SQUID에서 발생하는 전압을 측정하기 위하여 FLL를 이용한 되먹임회로를 써서 선형화된 출력을 얻을 수 있다. Control box는 SQUID 출력신호를 선형화하기 위한 되먹임회로, 출력 전압을 조절하기 위한 출력 조절기, 컴퓨터와 연결을 위한 인터페이스 회로부, 그리고 각 부분에 필요한 전원을 공급하기 위한 전원부로 구성된다.

가. 되먹임회로(Feedback circuit)

Head 에서 검출된 신호는 외부의 자속에 대하여 반복된 SQUID 신호를 나타내기 때문에 자속의 변화를 정확하게 알기 어려우므로 적분기를 써서 외부의 측정 자속과 같은 크기의 자속을 되먹임 코일로 다시 SQUID에 인가하여 자속에 대한 신호의 변화가 선형화 되도록 하는 FLL를 구성한다. 그림 2-5-8에서 적분기를 포함한 되먹임 회로를 구성하여 FLL를 이루기 위한 전체의 회로를 보이고 있다.

나. 출력조절기

Swing 전압 측정시 증폭기를 이용하여 신호를 처리하며 FLL 상태에서는 적분기를 사용하여 되먹임회로를 구성하고 이 때의 출력은 증폭기를 이용하여 적당한

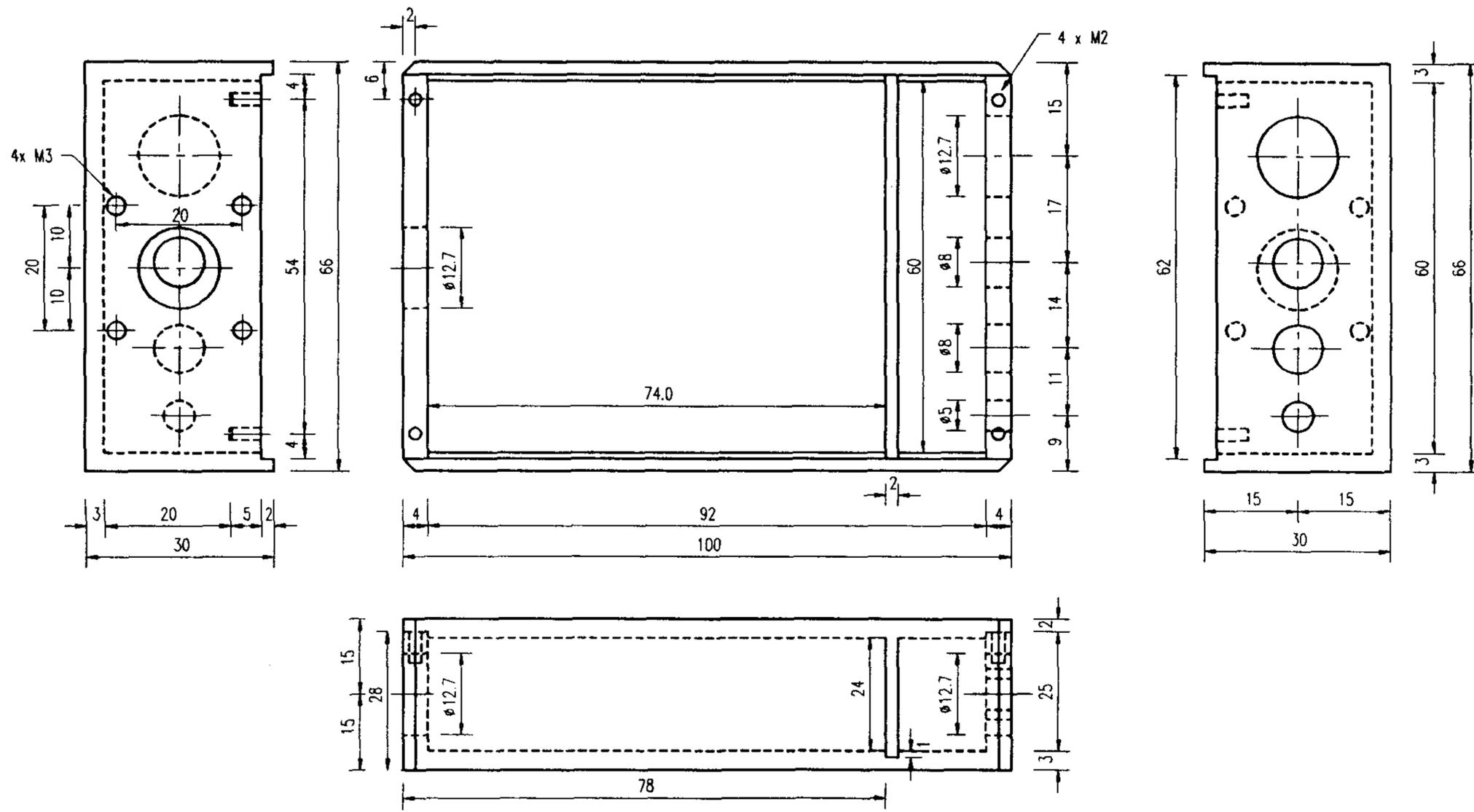
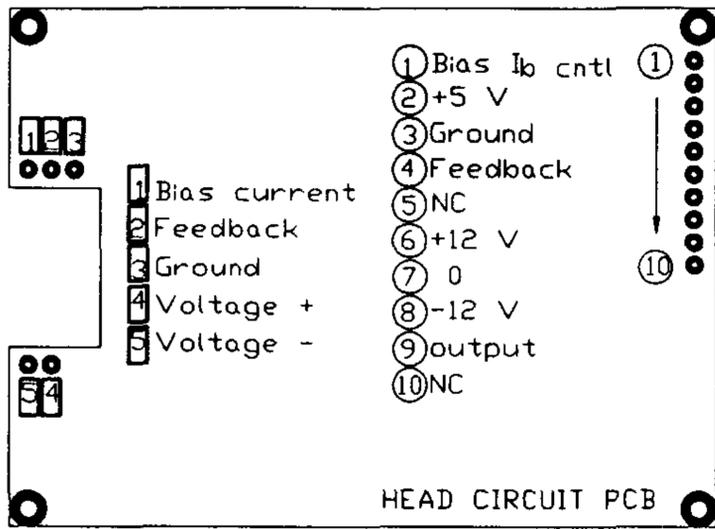
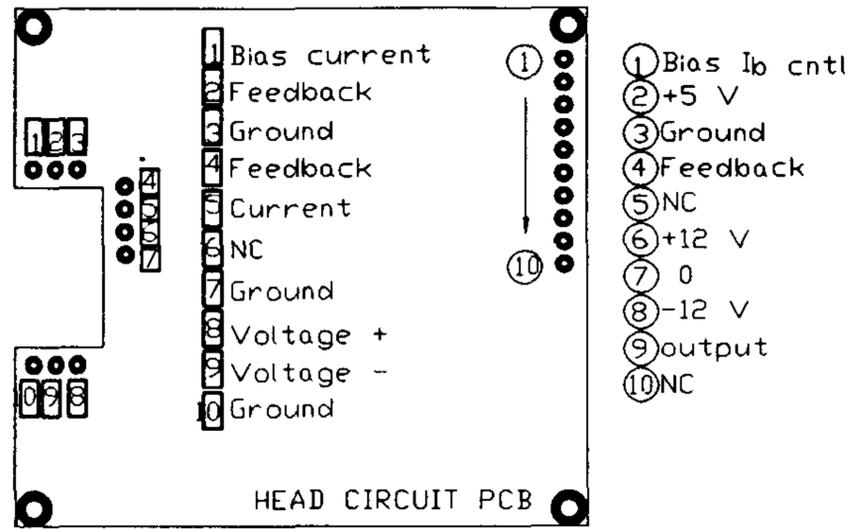


Fig. 2-5-5. Drawing of head box.



(a)



(b)

Fig. 2-5-6. PCB connection for SQUID signal control in head box.
 (a) Standard type head PCB, (b) DROS type head PCB.

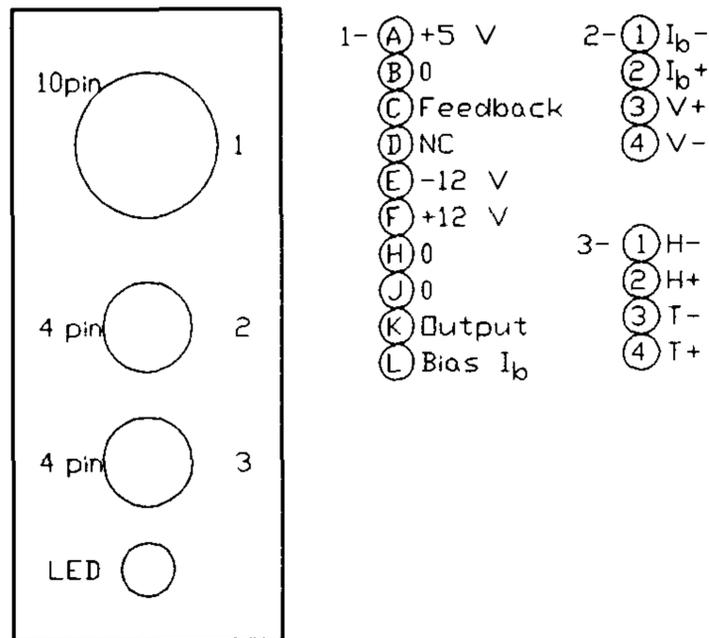


Fig. 2-5-7. Head connection for SQUID control.

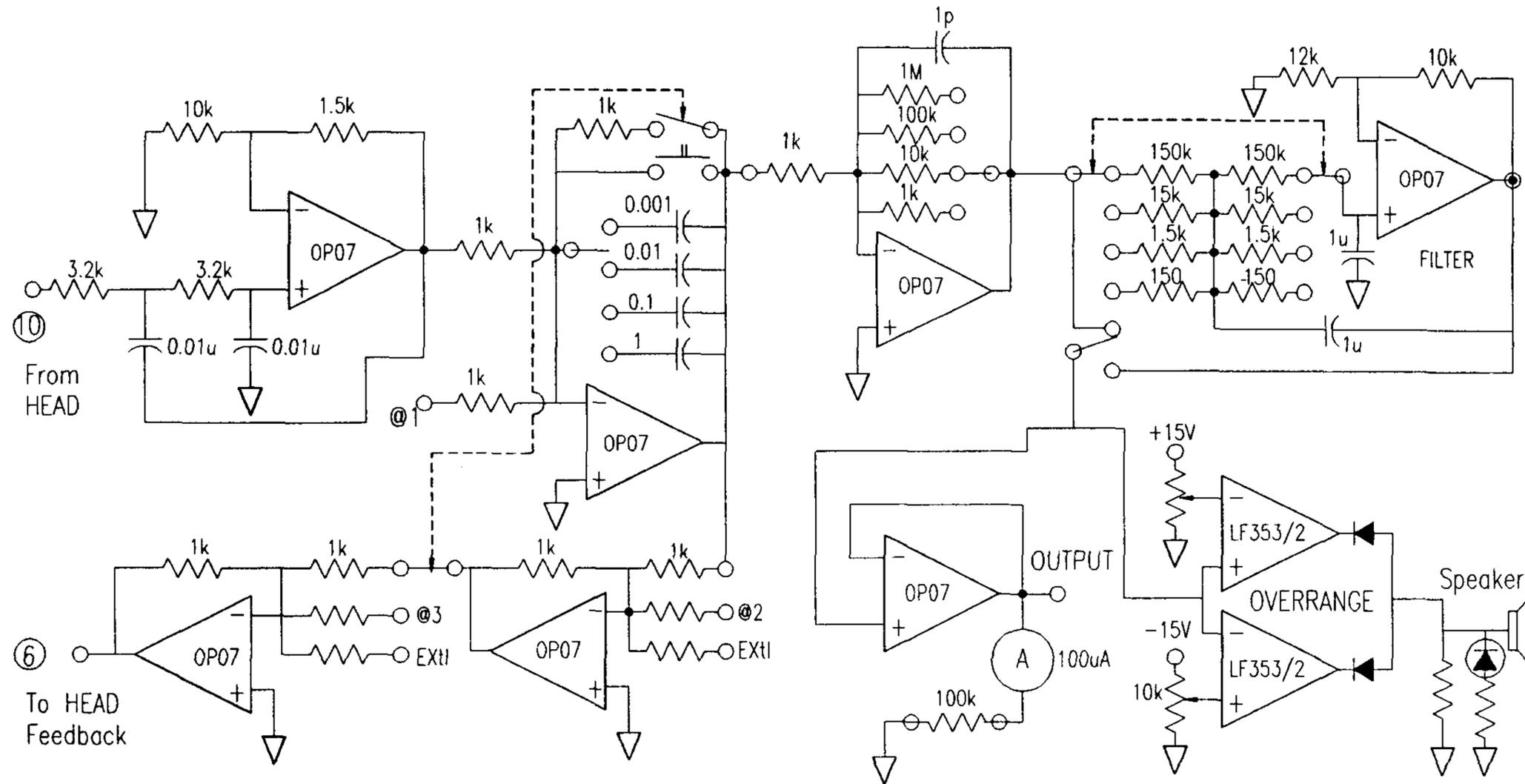


Fig. 2-5-8. Feedback loop circuit for FLL(Flux Locked Loop).

크기로 조절하여 BNC 또는 계기를 이용하여 출력신호를 처리한다. 적분기는 1 차 적분기로서 4 가지의 적분 상수를 선택할 수 있으며 선택은 control box 전면 스위치로 할 수 있다. 출력신호 조절을 위한 증폭기는 1, 10, 100, 1000 배의 증폭률을 가지며 전면 스위치또는 컴퓨터를 이용하여 조종된다. 그림 2-5-9는 control box 전면을 보이고 있는데 왼쪽 부분이 출력을 표시할 수 있는 dc 전류계, 오른쪽은 SQUID control 스위치이며 각 채널에 따른 인가전류 및 locked-in 조절기 등이 있다. 이들의 전면 스위치는 4 개의 SQUID 출력신호를 순차적으로 선택하여 동시에 4 개의 SQUID가 동작하도록 하였다.

되먹임회로를 동작하지 않을 때 즉 FLL 시키지 않을 경우에는 외부 자속에 대한 SQUID 신호는 반복된 swing 전압을 나타내며 이러한 신호는 직접 control box 내의 증폭기 및 여파기를 통과하여 BNC를 통하여 출력된다. 그러나 이러한 swing 출력 신호는 box 전면에서 부착된 계기를 통하여 거의 표시되지 않는데 전면의 출력 계기가 dc 만을 표시하기 때문이다.

FLL 상태에서 출력은 외부자속에 비례하여 적분기의 출력으로 나타나며 이 때의 출력은 여파기 등을 통하여 BNC 또는 계기를 통하여 표시되나 일정한 주기를 가지는 자속에 대한 출력 신호는 dc 출력만을 표시하는 계기에는 나타나지 않으며 이러한 변화하는 신호는 출력단자를 오실로스코프에 연결하거나 컴퓨터를 이용하여 그 변화를 볼 수 있다.

다. 인터페이스 회로

SQUID 출력신호를 외부 컴퓨터와 연결하거나 출력신호를 조절하기 위한 스위치를 조정하기 위하여 출력신호와 디지털 스위치를 A/D card를 이용하여 컴퓨터에서 조정하고 신호를 처리하기 위하여 인터페이스 회로를 구성하였다.

그림 2-5-10에서 출력신호 조절을 위한 디지털 스위치 회로를 보이고 있다. 컴퓨터를 이용하여 A/D card의 디지털 신호를 써서 적분기, 증폭율, 여파기 등의 출력신호를 조정할 수 있도록 하였으며 4 개의 SQUID 신호를 순차적으로 또는 선택

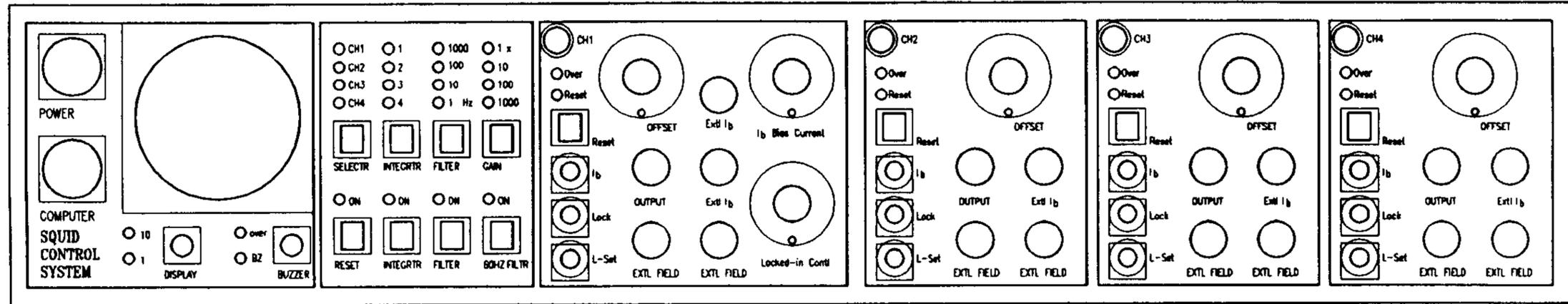
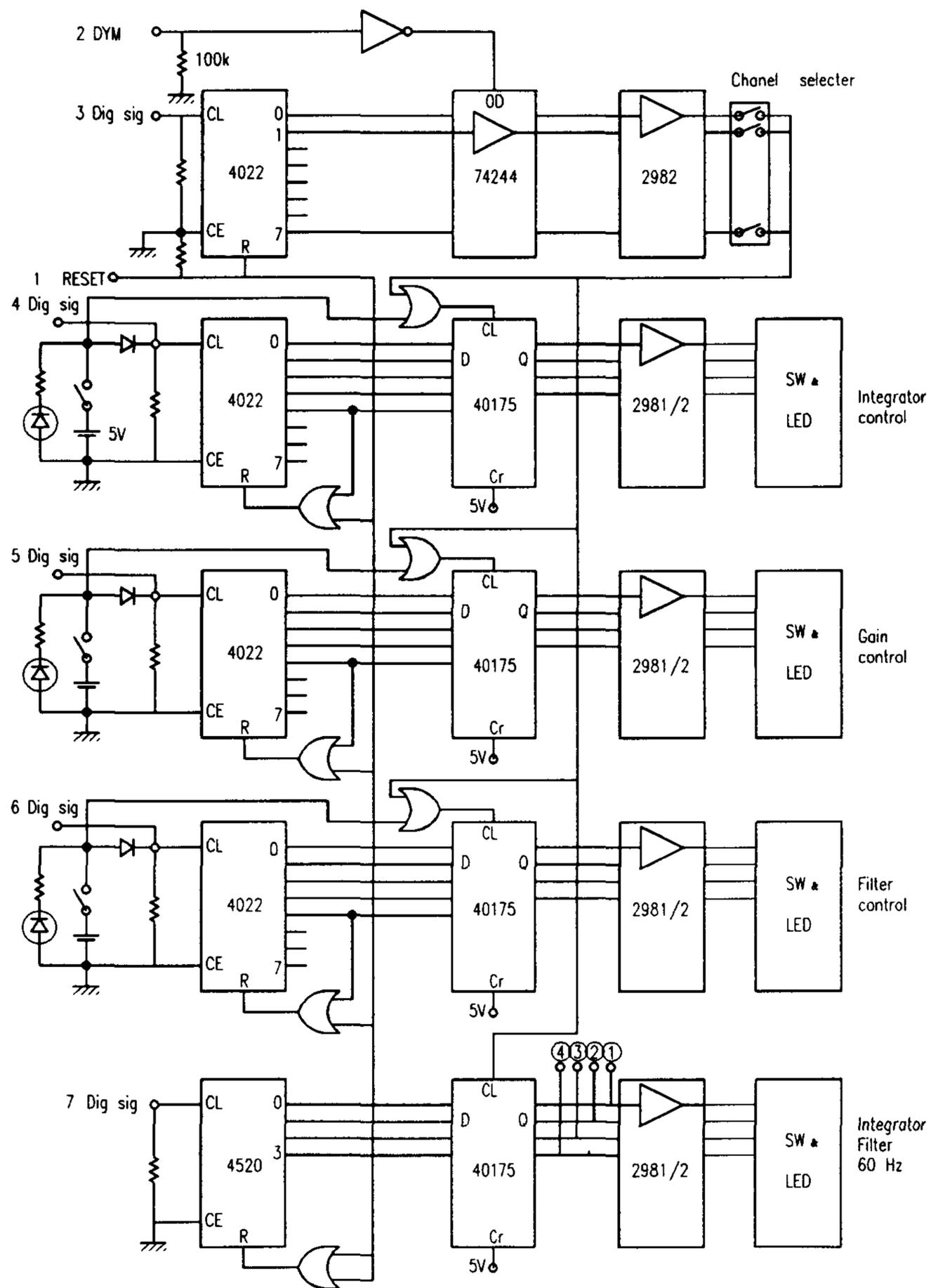


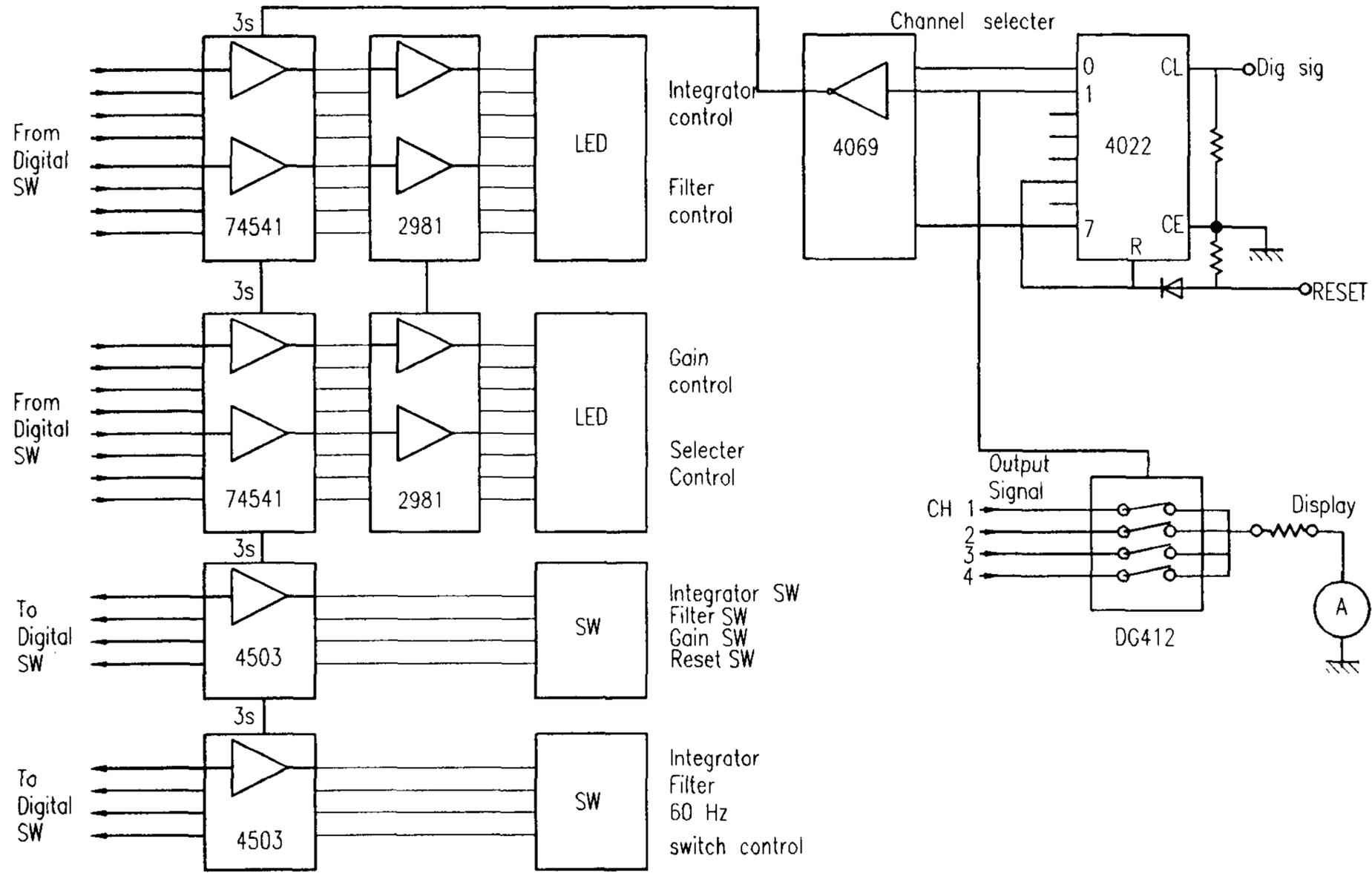
Fig. 2-5-9. Control panel of SQUID control box.



(a)

Fig. 2-5-10. Digital switching circuit for computer interface.

(a) Digital switch control, (b) channel selector control.



(b)

Fig. 2-5-10. continued

적으로 신호를 측정할 수 있도록 조정할 수 있다. 4 개의 SQUID 출력신호를 측정하기 위하여 100 kHz sampling 속도를 갖는 A/D 단자를 이용하여 순차적으로 신호를 측정하여 컴퓨터로 나타낼 수 있게 하였다. 그러나 4 개의 신호를 real time 으로 측정하기 위해서는 16 bit 이상의 빠른 A/D card 및 출력기가 필요하다.

4. SQUID controller 운용

가. Swing 전압 측정

자속에 대한 SQUID의 신호를 알아보기 위하여 적분기를 이용한 되먹임회로를 동작시키지 않고 feedback 코일로 삼각파형의 전류를 흐르게 하여 삼각파형의 일정한 자속을 SQUID에 주어 여기에서 발생하는 전압을 측정한다. Swing 전압은 인가 전류원의 크기에 따라서 변화하기 때문에 최적의 전류를 인가하기 위하여 I-V를 측정하여 적당한 전류를 선택할 수 있다. 최적의 전류값을 알 수 없는 경우 전류원을 0 으로부터 천천히 높여 가면서 SQUID의 출력을 측정한다.

그림 2-5-11은 되먹임코일을 통하여 SQUID에 인가되는 자속에 따른 SQUID 출력 파형을 보이고 있으며 전류원에 따른 SQUID의 swing 전압을 함께 보이고 있다. 일반적으로 FLL을 동작시킬 경우 가장 높은 감도를 가지기 위하여 swing 전압이 가장 큰 전류값을 선택한다.

나. FLL (Flux Locked Loop)

최적 상태의 전류를 인가하고 되먹임 코일을 통하여 전류를 흐르게 하여 swing 전압의 중앙부분에 위치하도록 control box 전면의 locked-in 다이얼를 조정하여 locked-in 점을 잡는다. Locked-in 조절기를 돌려 양자자속만큼 증감하면 다시 같은 전압을 보이며 이것은 SQUID의 swing 전압을 나타내고 있음을 보이고 있는 것이다. Locked-in 상태에서 적분기와 되먹임회로를 동작시켜 FLL 상태를 유지한다. Control box 전면의 offset 조절기를 이용하여 양자자속 이상의 자속을 SQUID

에 인가할 경우 출력값이 선형적으로 변화하여 측정된다. 만일 선형적으로 나타나지 않을 경우 FLL의 상태가 되지 않은 것을 나타낸다.

FLL 상태에서의 동작 특성을 알아보기 위하여 되먹임 코일을 이용하여 sine 파형의 자속을 인가하여 확인할 수 있으며 동시에 sine 파의 크기 및 주파수를 변화시켜 slew rate를 측정 할 수 있다.

감도를 알아보기 위하여 FLL 상태에서 offset 조절기를 이용하여 자속을 변화시켜 이 때의 출력을 측정하여 자속에 대한 SQUID의 감도를 측정한다. SQUID의 잡음을 측정하기 위하여 SQUID의 pick-up 코일을 단락시키거나 open 시킨후 출력 단자를 spectrum analyzer에 연결하여 조사할 수 있다.

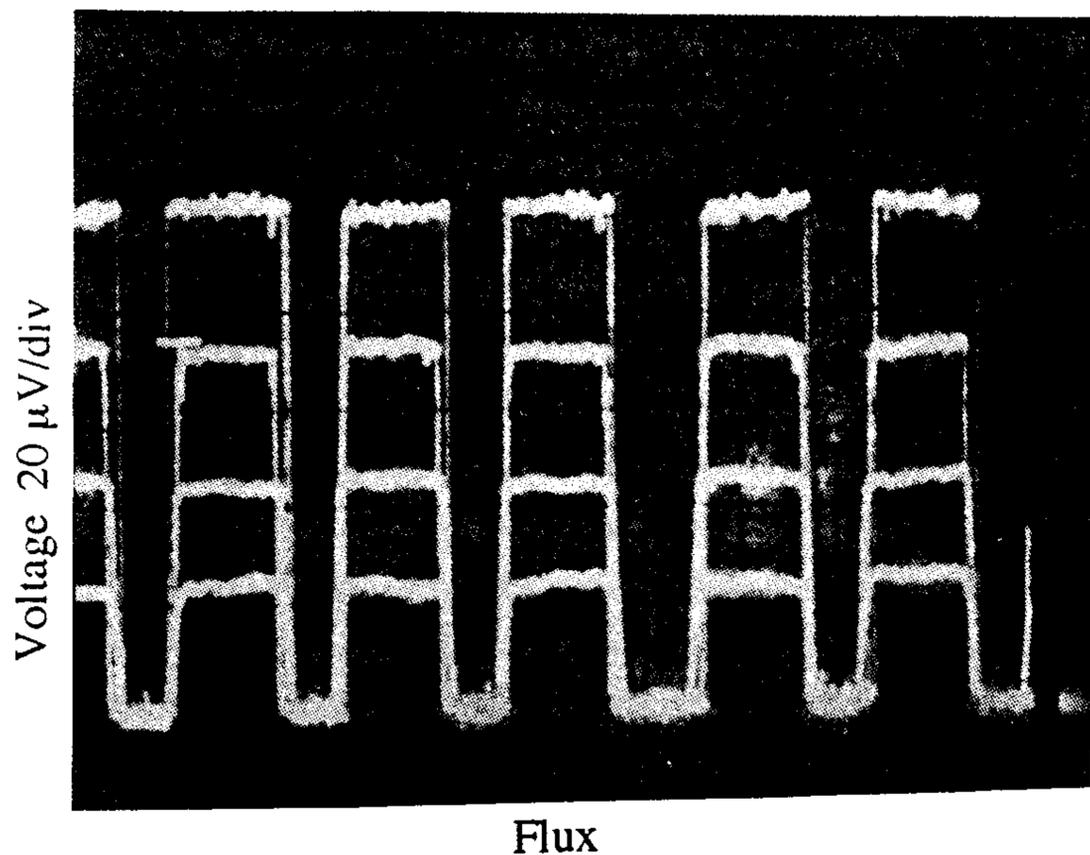


Fig. 2-5-11. Swing voltage patterns to external magnetic field with various bias currents.

제 6 절 성능개선을 위한 새로운 DROS 설계

1. DROS 설계

DROS의 자속잡음은 relaxation 주파수의 제곱근에 반비례하기 때문에 relaxation 주파수를 증가시키면 flux noise는 감소한다. 따라서 SQUID의 잡음특성을 개선하기 위하여 relaxation oscillation 주파수를 1 GHz로 높이고, axial gradiometer를 위한 센서뿐만 아니라 검출코일을 SQUID와 같은 기판상에 형성시킨 integrated SQUID magnetometer 및 planar gradiometer도 포함된 새로운 포토 마스크를 설계·제작하였다.

가. Integrated magnetometer 설계

신호 SQUID는 두개의 SQUID loop이 parallel 연결된 gradiometer type 구조로 균일한 자기잡음에는 반응하지 않도록 되어있다. 한쪽의 SQUID loop의 hole 크기는 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 이므로 loop 인덕턴스는 80 pH이다. 접합에서 한쪽 hole까지의 길이는 $125\ \mu\text{m}$ 이므로 슬릿에 의한 인덕턴스 50 pH를 포함하여 한쪽 SQUID loop의 전체 인덕턴스는 130 pH이다. 따라서 병렬연결된 두 SQUID loop의 전체 인덕턴스는 65 pH가 된다. SQUID의 washer resonance를 없애기 위해 $6\ \Omega$ 저항 두개를 SQUID 양단에 병렬연결하였다. 조셉슨 접합의 크기는 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 이다. 기준접합의 크기는 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 인데 이는 신호 SQUID의 최대 임계전류 값의 78%에 해당한다.

입력 코일의 선폭은 $4\ \mu\text{m}$ 이며 감은횟수는 2×10 turn이다. 따라서 인덕턴스는 26 nH이며 SQUID와의 상호인덕턴스는 coupling 계수를 0.9라고 할때 2.3 nH로 계산된다. 입력코일의 parasitic capacitance에 의한 공진을 damping하기 위해 $10\ \Omega - 90\ \text{pF}$ 로 된 RC 회로를 입력코일에 부착하였다.^[8] Feedback coil은 1 turn의 코일이 SQUID loop 외곽에 형성되어 있다. 검출코일의 선폭은 $20\ \mu\text{m}$ 이며 크기는 2.9

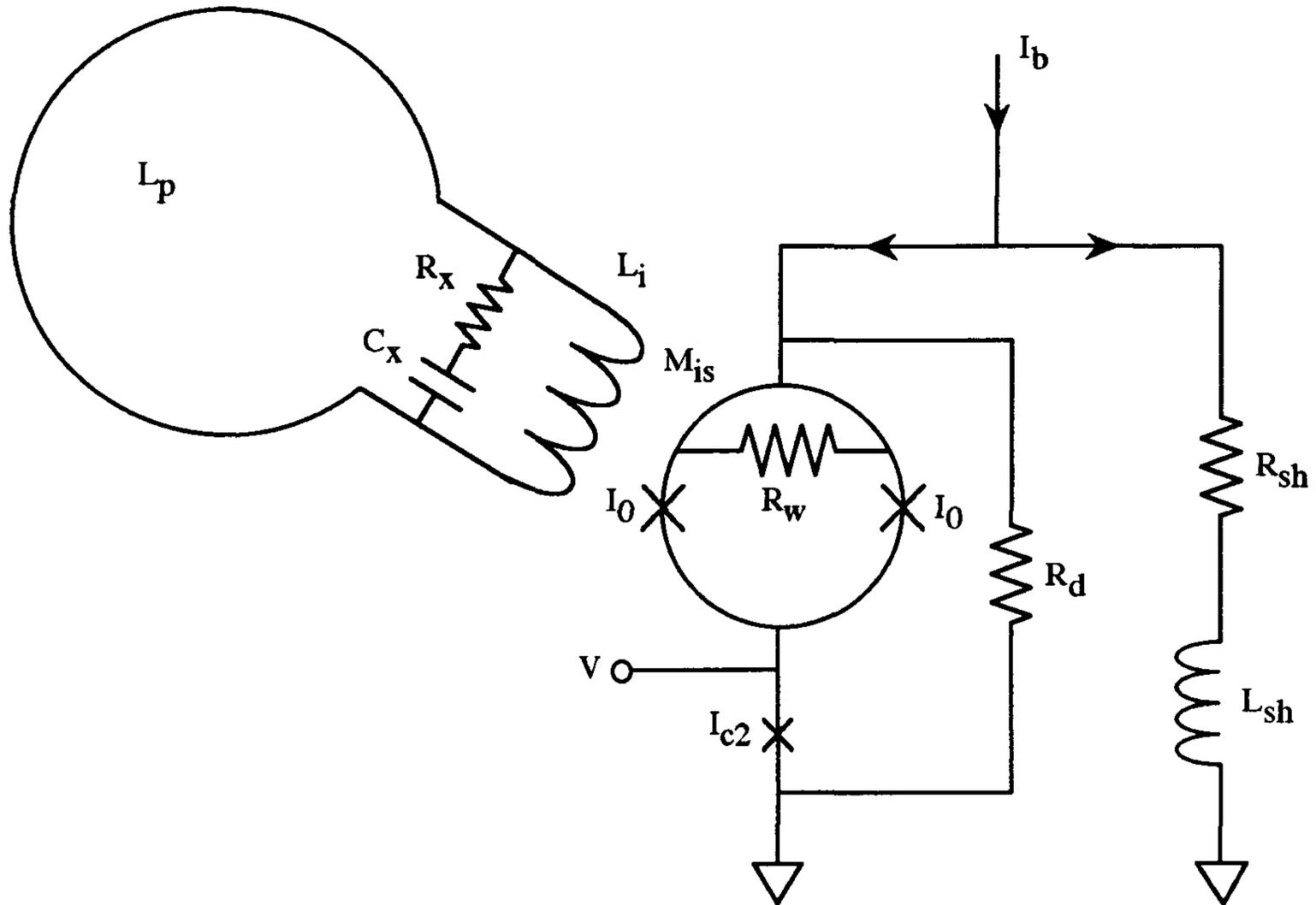


Fig. 2-6-1. Schematic drawing of the DROS magnetometer. R_d : resistor to damp the resonance between L_{sh} and SQUID capacitance,
 R_w : resistor to damp the resonance in the SQUID washer,
 R_x, C_x : damping circuit to damp the resonance in the input coil.

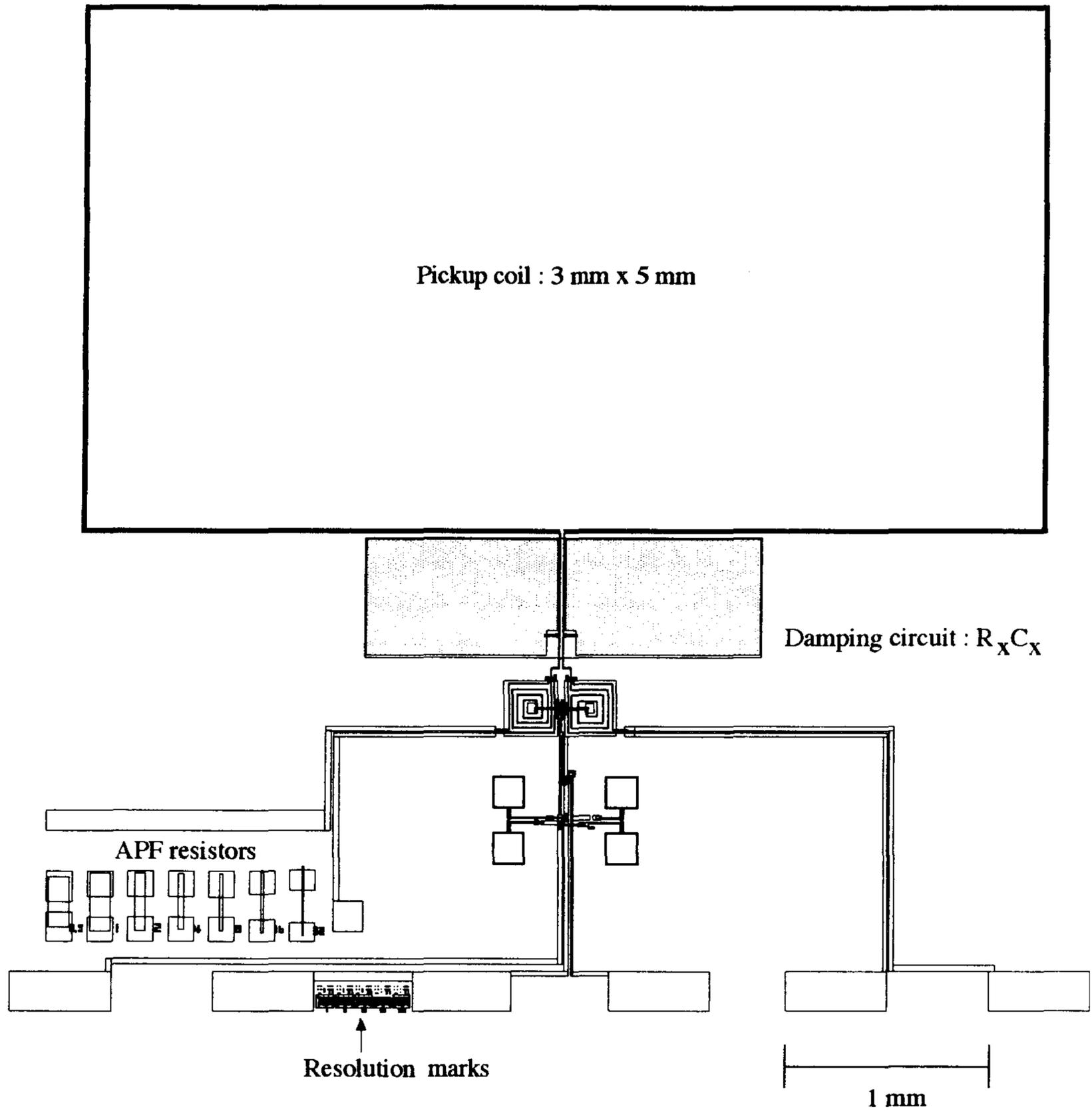


Fig. 2-6-2. Design layout of the DROS magnetometer.

mm x 5.08 mm인데 인덕턴스는 약 17.6 nH 로 계산된다. 따라서 검출코일 자장과 SQUID 자속간의 변환계수는 $2.6 \text{ nT}/\phi_0$ 가 된다.

Relaxation 회로는 저항 15Ω , 인덕턴스 1 nH로 설계되었으므로 relaxation oscillation 주파수는 약 1 GHz내외가 된다. 특히 인덕터는 외부자장의 영향을 받지 않도록 serial gradiometer형태로 되어 있다. Relaxation 회로의 인덕터와 SQUID의 capacitance에 의한 공진을 없애기 위해 신호 SQUID-기준접합 양단에 50Ω damping 저항을 부착하였다.

나. Planar gradiometer 설계

신호 SQUID는 두개의 SQUID loop이 parallel 연결된 gradiometer type 구조로 균일한 자기잡음에는 반응하지 않도록 되어있다. 한쪽의 SQUID loop의 hole크기는 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 이므로 loop 인덕턴스는 160 pH이다. 접합에서 한쪽 hole까지의 길이는 $190 \mu\text{m}$ 이므로 슬릿에 의한 인덕턴스 76 pH를 포함하여 한쪽 SQUID loop의 전체 인덕턴스는 236 pH이다. 따라서 병렬연결된 두 SQUID loop의 전체 인덕턴스는 118 pH 가 된다. SQUID의 washer resonance를 없애기 위해 6Ω 저항 두개를 SQUID 양단에 병렬 연결하였다. 조셉슨 접합의 크기는 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 이다. 기준접합의 크기는 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 인데 이는 신호 SQUID의 최대 임계전류값의 78 %에 해당한다.

입력코일의 선폭은 $4 \mu\text{m}$ 이며 감은 횟수는 2×17 turn이다. 따라서 인덕턴스는 136 nH이며 SQUID와의 상호인덕턴스는 coupling 계수를 0.9라고 할때 7.2 nH로 계산된다. 입력코일의 parasitic capacitance에 의한 공진을 damping하기 위해 10Ω -150 pF로 된 RC 회로를 입력코일에 부착하였다. Feedback coil은 1 turn의 코일이 SQUID loop 외곽에 형성되어 있다. 검출코일의 선폭은 $20 \mu\text{m}$ 이며 크기 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 인 두개의 코일이 '8'자 모양으로 serial 연결되어 있어 균일한 자기잡음에는 반응하지 않도록 설계되어 있다. 검출코일의 인덕턴스는 약 110 nH 로 계산된다. 검출코일이 균일한 외부잡음에 대해서만 gradiometer기능을 하고 근접한

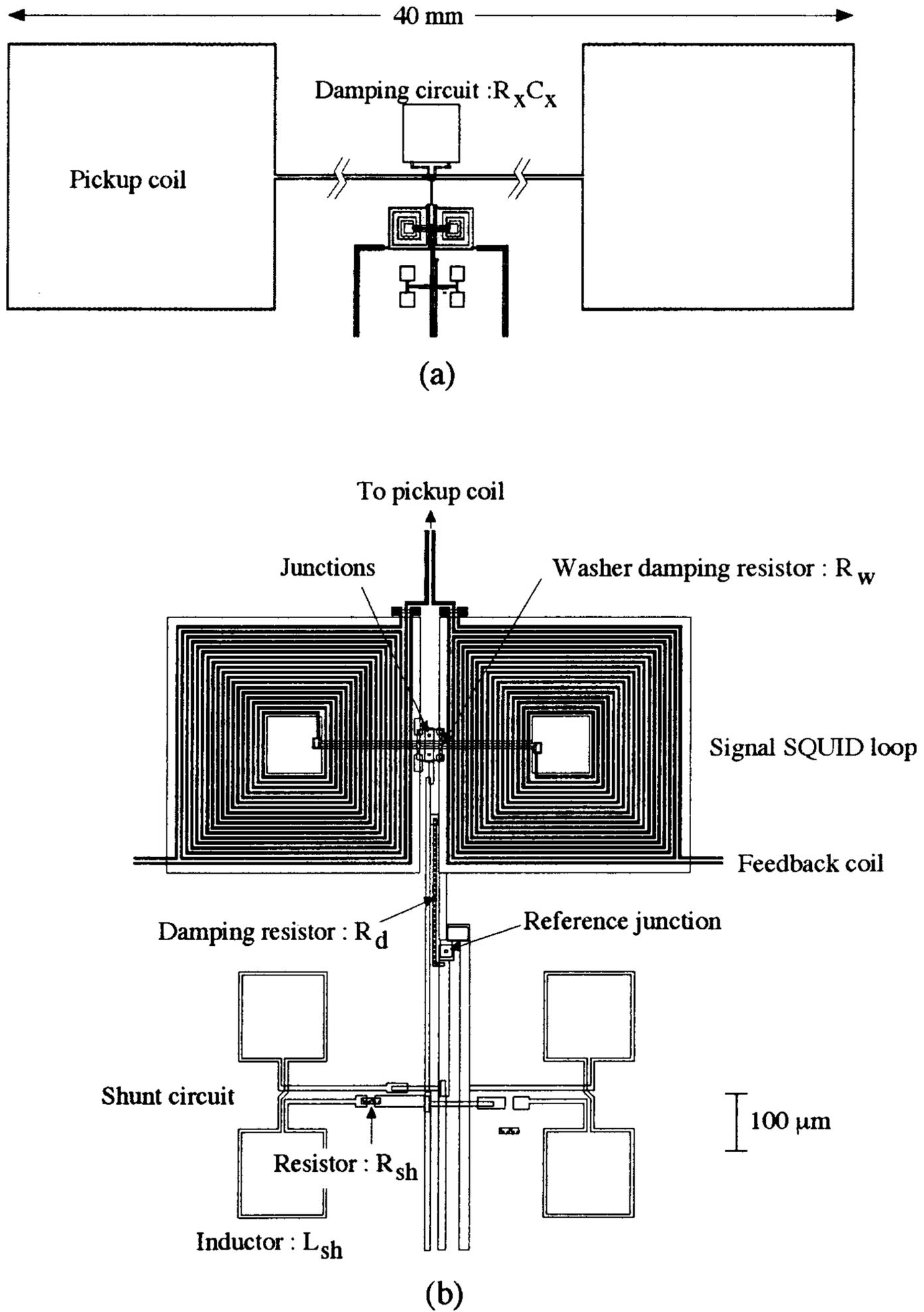


Fig. 2-6-3. Schematic overview of the DROS planar gradiometer(a) and close-up view of the SQUID loop(b).

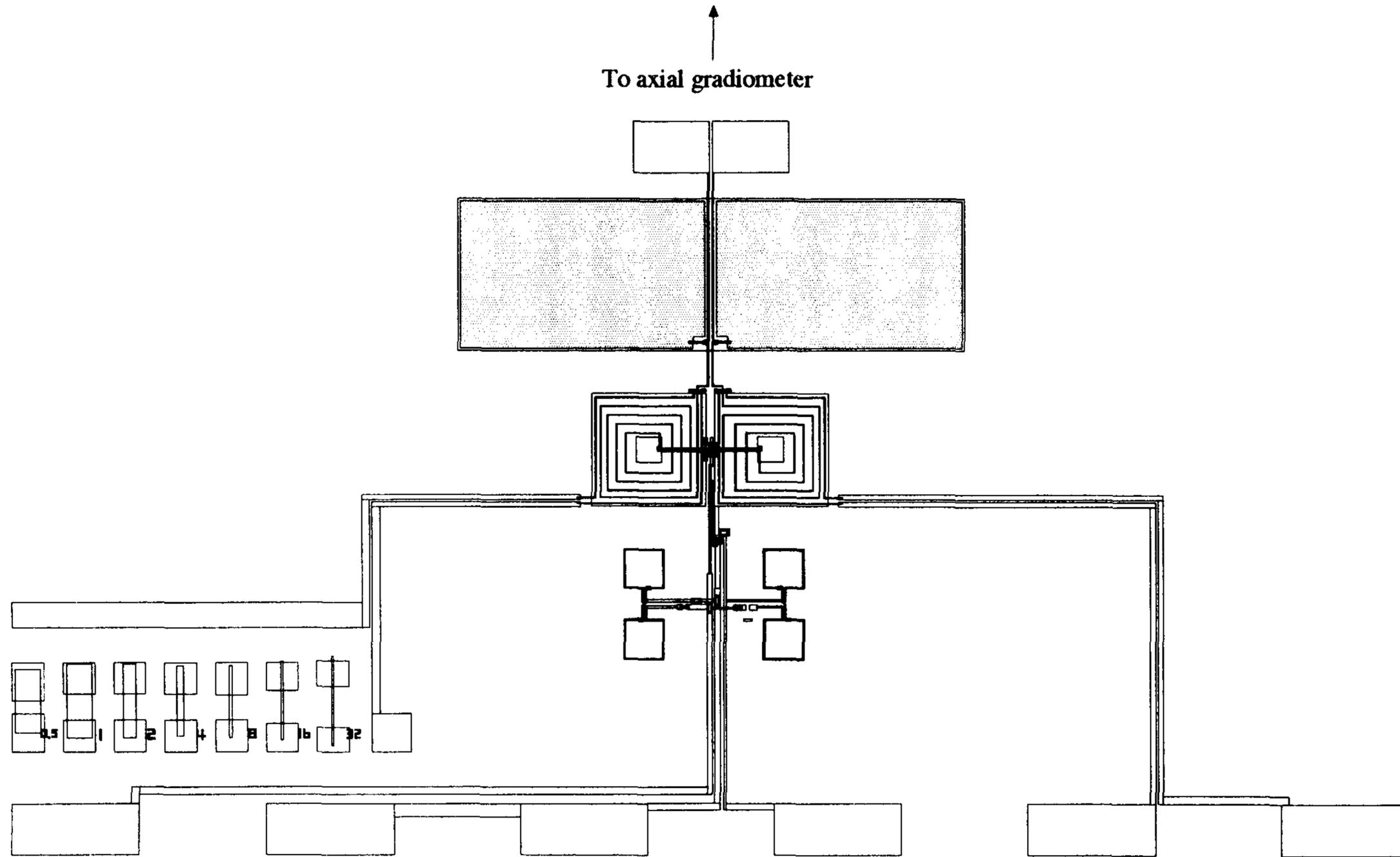


Fig. 2-6-4. Schematic overview of the DROS sensor for axial gradiometer.

신호원에 대해서는 두개의 코일중 proximal coil만이 반응한다고 할때 검출코일 자장과 SQUID 자속간의 변환계수는 $0.7 \text{ nT}/\Phi_0$ 가 된다. 또한 이 값을 baseline(=3 cm)으로 나누면 자장기울기에 대한 변환계수는 $0.23 \text{ nT}/\Phi_0 \cdot \text{cm}$ 가 된다.

Relaxation 회로는 저항 1.5Ω , 인덕턴스 1 nH 로 설계되었으므로 relaxation oscillation 주파수는 약 1 GHz 내외가 된다. Relaxation 회로의 인덕터와 SQUID의 capacitance에 의한 공진을 없애기 위해 신호 SQUID-기준접합 양단에 50Ω damping 저항을 부착하였다.

다. Axial gradiometer용 SQUID

검출코일이 Nb wire로 된 axial gradiometer 또는 magnetometer를 사용할 수 있도록 설계하였으며 SQUID chip상의 입력코일 pad에 초전도 bonding을 할 수 있도록 되어있는것 이외에는 전체적인 설계 parameter는 planar gradiometer와 동일하며 입력코일의 공명을 damping하기 위한 RC 회로값만 $10 \Omega - 90 \text{ pF}$ 로 다르다. 그림 2-6-4는 센서의 전체 구조를 보여준다.

2. 제작 및 특성조사

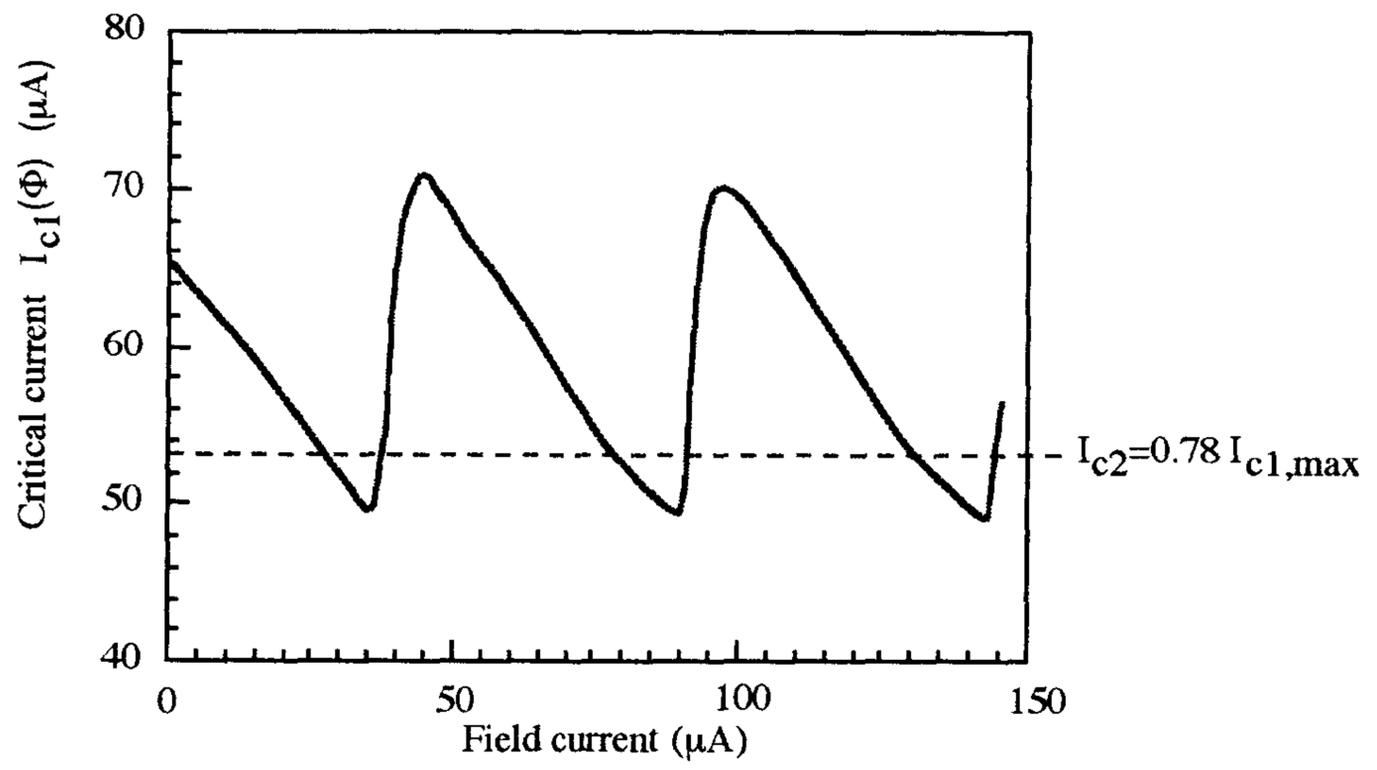
센서는 제작공정을 간단히 하기 위해 4 level process를 이용하며 모두 5 장의 포토마스크를 사용하였다. 3 인치 Si 웨이퍼위에 5 개의 planar gradiometer, 6 개의 magnetometer 및 6 개의 axial gradiometer 용 센서가 동시에 제작된다. 1 차 제작된 센서의 특성을 조사한 결과, 접합의 임계 전류밀도가 설계값보다 2 배 정도 크고 Pd 저항값은 약 0.3 배로 제작되었다. 그림 2-6-5는 magnetometer의 변조특성을 보여주는 결과이다. (a)는 신호 SQUID의 임계 전류값의 변조곡선인데 변조 진폭은 최대 임계 전류값의 약 30 % 로서, 이로부터 신호 SQUID의 β 를 계산하면 2 내외가 된다. 따라서 기준 임계 전류값은 변조범위 중에서 낮은 쪽, 즉, $I_{c1,min}$ 에 가까이 위치하게 되고 그 결과 전압-자속 곡선은 그림 2-6-5(b)와 같이 전압상

태의 폭이 0 전압상태의 폭보다 상대적으로 넓어지게 된다.

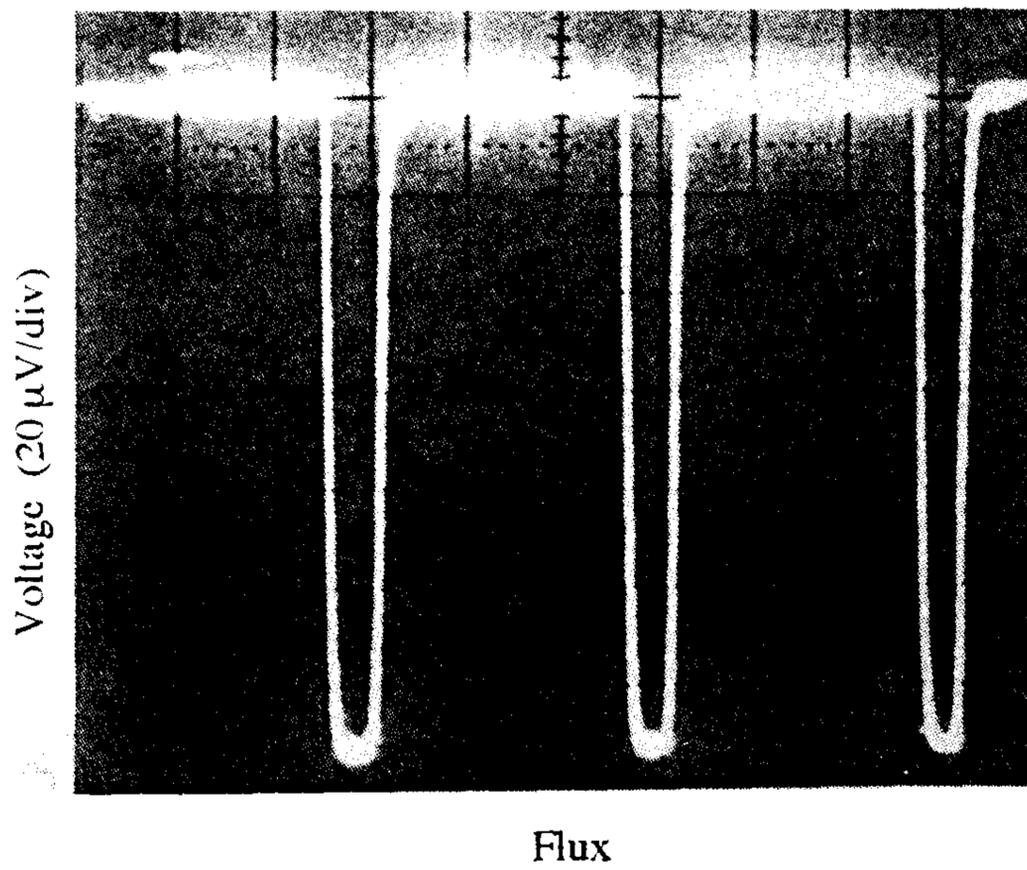
DROS magnetometer를 한겹의 납으로 된 튜브내에서 FLL 동작을 시킨 결과 SQUID자속잡음은 100 Hz에서 $7.6 \mu \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었고 이를 검출코일에서의 자장잡음으로 환산하며 $20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 된다. 그런데 측정된 잡음 스펙트럼에는 60 Hz를 포함한 자장잡음도 포함되어 있는데 이는 납튜브의 불완전한 차폐때문이며, SQUID 자체의 잡음특성은 이보다 좋을 것으로 판단된다. 또한 납튜브를 사용하지 않고 자력계를 외부 잡음에 직접 노출시킨 상태에서 FLL 동작을 시킨 결과 장시간(3 시간이상)동안 FLL 상태를 잃지않는 안정된 동작특성을 보이므로써 외부 잡음에 대한 slew rate도 충분히 큰 것을 확인하였다.

또한 센서와 controller가 서로 별개인 두개의 자력계 시스템을 동시에 작동시켰다. 그림 2-6-6(a)는 서로 2 cm 떨어진 두개의 자력계가 있는 액체헬륨 dewar에서 약 2 m 떨어진 위치에서 screw driver를 움직이면서 측정한 controller 출력이 다. 두 센서가 거의 똑같이 외부신호에 반응하고 있음을 알 수 있다. 한편 상용의 differential preamp(Ithaco 1201)를 이용하여 두개의 SQUID controller 출력을 서로 빼주는 소위 'electronic gradiometer'를 형성한 결과가 그림 2-6-6(b)이다. 공간적으로 비교적 균일한 인위적 잡음 신호에 대해 electronic gradiometer는 잘 동작되고 있음을 나타낸다. Imbalance에 기여하는 요인으로는 두 controller의 feedback 상수의 차이 및 잡음 신호의 공간적 차이 등이 있는데 differential preamp의 gain을 미세조정하므로써 balance를 개선할 수 있을 것으로 생각된다.^[9] 결론적으로 검출코일이 SQUID와 같은 기판위에 제작된 planar 형태의 DROS 자력계가 electronic gradiometer 및 헬륨홀즈 코일을 이용한 active shielding을 위한 자력계로 사용될 수 있음을 확인하였다.

한편 planar gradiometer와 axial gradiometer용 센서의 경우에는 SQUID loop의 인덕턴스가 magnetometer보다 커서 신호 SQUID의 β 가 4 내외로 측정되었고, 기준 접합의 임계 전류값은 신호 SQUID의 임계 전류 변조범위 밖(아래)에 위치해서 DROS가 임계 전류 비교기 기능을 하지 못하고 그 결과 자속-전압 곡선을 얻을 수 없었다. 이는 앞으로 조셉슨 접합의 전류밀도를 현재 1 차 제작된 값의 반으로

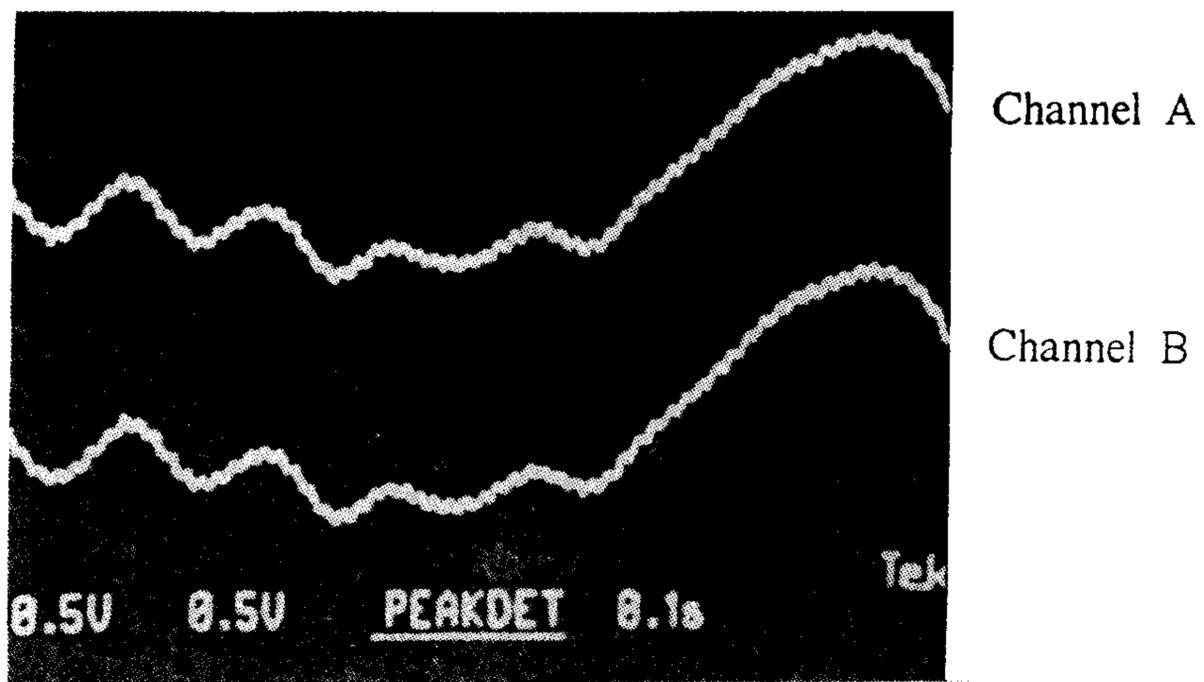


(a)

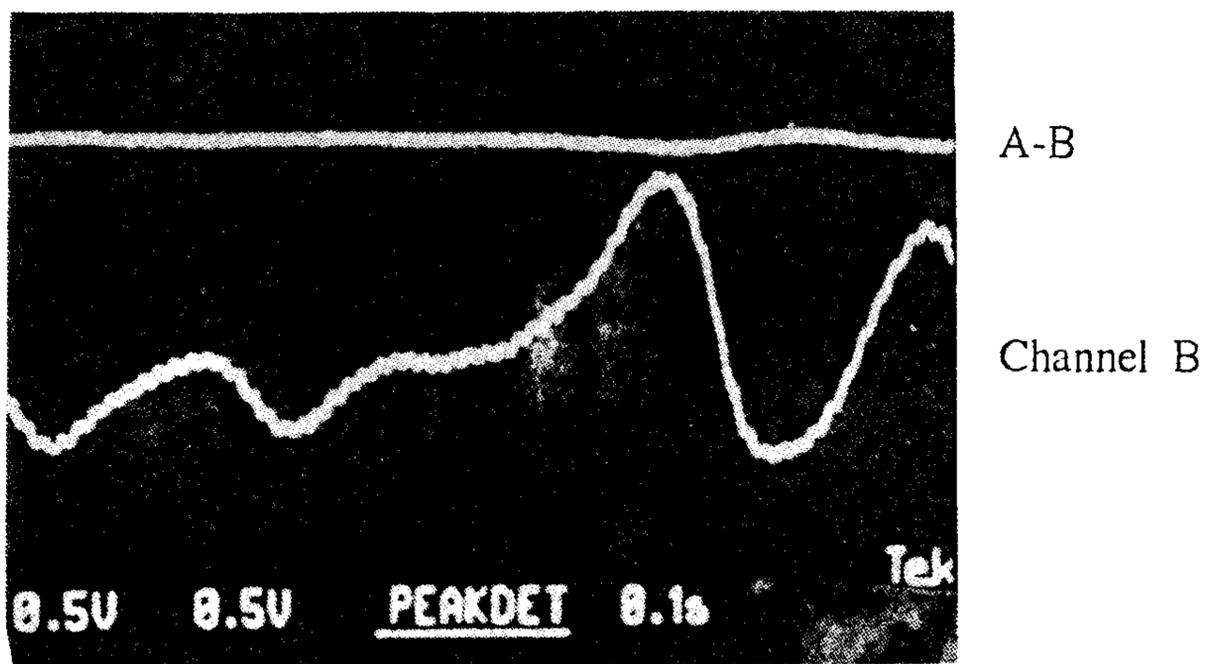


(b)

Fig. 2-6-5. Critical current modulation of the signal SQUID(a) and flux-voltage curve(b).



(a)



(b)

Fig. 2-6-6. Controller outputs of two separate magnetometer(a) and electronically balanced output(b)

제 7 절 결 론

DROS는 자속-전압 변환계수가 standard dc SQUID 에 비해 약 100배 정도 더 크고 자속변조를 하지 않기 때문에 slew rate가 높다. 따라서 자기잡음이 시간적으로 크게 변하는 차폐되지 않은 공간에서 자력계로 사용하기에도 매우 유리하다. 본 연구에서는 기존 접합을 이용한 DROS를 이용하여 보통 $5 \text{ mV}/\Phi_0$ 내외의 매우 큰 자속-전압 변환계수를 얻었다. 특히 DROS는 APF를 이용한 SQUID나 series-array SQUID와는 달리 SQUID 특성조사후 정확한 APF회로를 연결해야 하는 번거로움도 없고 까다로운 제작과정이 필요 없다.

한편 간단한 구동회로를 이용하여 SQUID의 자속잡음을 측정한 결과 $9 \mu \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 값을 얻었고 유효자장잡음은 $36 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 계산되는데 검출코일의 검출면적을 증가시키면 개선될 수 있다.

SQUID의 잡음특성을 개선하고 compact한 multichannel시스템을 위해 검출코일이 SQUID와 같은 기판상에 집적화된 magnetometer 및 gradiometer를 설계하고 일차 제작하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Fathimulla, J. Vac. Sci. Technol. B3, 25 (1985)
- [2] D. J. Adelerhof, M. E. Bijlsma, P. B. M. Fransen, T. Weiman, J. Flokstra and H. Rogalla, Physica C, 209, 477 (1993)
- [3] J. Kawai, G. Uehara, N. Mizutani, Y. Kondo, N. Harada and H. Kado, Proc SQUID'91, Springer Proceedings in Physics, 64, 341 (1992)
- [4] D. J. Adelerhof, H. Nijstad, J. Flokstra and H. Rogalla, IEEE Trans. Appl. Supercon. 3, 1862 (1993)
- [5] J. M. Jaycox and M. B. Ketchen, IEEE Trans. Magn. MAG-17, 400 (1981)
- [6] W. Jaszczuk, H. J. M. ter Brake, J. Flokstra, D. Veldhuis, R. Stammis and H. Rogalla, Meas. Sci. Technol. 2, 1121 (1991).
- [7] D. J. Adelerhof, M. J. van Duuren, J. Flokstra and H. Rogalla, Appl. Supercon., 2, 1387 (1994)
- [8] J. Knuutila, A. Ahonen and C. D. Tesche, T. Low Temp. Phys., 68, 269 (1987)
- [9] H. J. M. ter Brake, Z. Dunajski, W. A. G. van der Mheen and J. Flokstra, J. Phys. E 22, 560 (1989).

제 3 장 미소접합 제작

제 1 절 단전자 효과

진공 중에서 전자 하나를 검출하는 것은 그리 어려운 일이 아니다. 하지만 물질 내에서는 전자 간의 거리가 전자의 양자역학적인 wavelength와 비슷하기 때문에 각 전자들의 운동을 조절하기가 용이하지가 않다. 그러나 최근 극저온 하에서 접합의 크기가 submicron 정도되면 전자의 접합 통과를 하나하나 조절할 수 있는 단전자 터널링 (Single Electron Tunneling, SET) 현상이 실험적으로 관측되었다^[1-5]. 이러한 SET 현상의 기본 원리는 다음과 같다.

1. Single-Electron Transfer

두 금속 전극 사이에 아주 얇은 절연층이 끼어있는 그림 3-1-1과 같은 접합이 있다 하자. 이 접합에 전압 V 가 걸리면 전자들은 V/eR_t 의 rate로 절연층을 통과한다. 여기서 R_t 는 절연층의 넓이, 두께 등에 좌우되는 접합의 거시적인 변수이다. 접합을 이루는 두 금속 전극은 터널링 효과 외에 또 다른 거시적인 변수인 전기용량이 C 인 capacitor 역할도 한다. 금속저항과 접합의 전하수송은 비록 두 경우 다 $I-V$ 특성이 직선이지만 저항에서는 전하들이 연속적으로 저항체를 따라 움직이는 반면 접합에서는 전하들이 packet으로 접합을 통과한다는 점에 있어서 그 mechanism이 근본적으로 다르다.

그림 3-1-2(a)는 접합과 capacitor C_s 가 직렬로 연결된 경우이다. 이 경우 접합과 capacitor 사이의 전극은 완전히 절연체로 둘러싸인 고립된 전극을 형성한다. 고립된 전극은 전하량이 각각 Q 와 Q_s 인 C 와 C_s 를 통해 정전기적으로 나머지 회로와 연결되어 있으며 전자들은 오로지 터널링에 의해서만 고립된 전극으로 들어가거나 나올 수 있다. 전하량 Q 와 Q_s 는 연속적인 값을 갖는 변수인 반면 Q 와 Q_s 간의 차

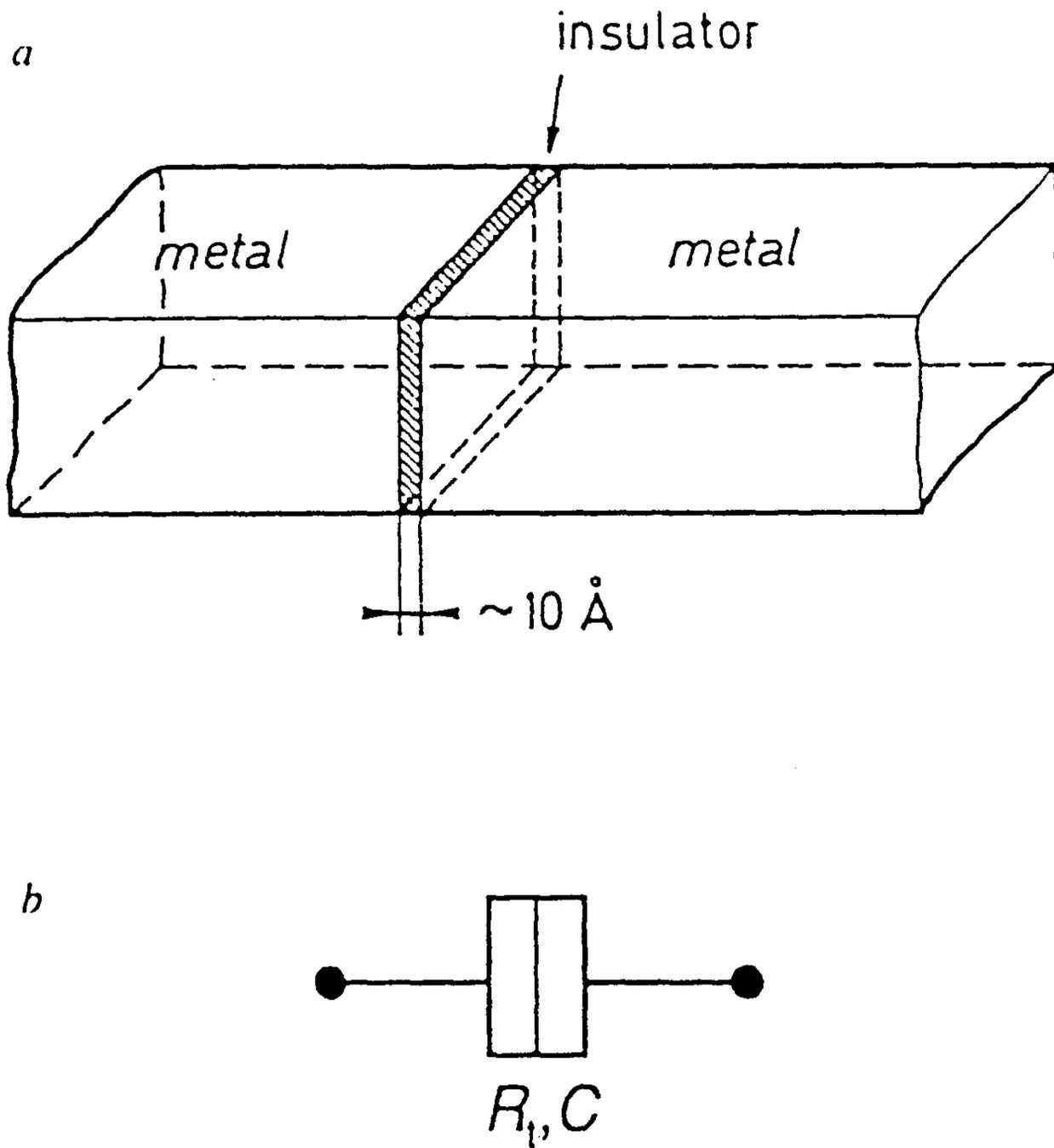


Fig. 3-1-1. (a) Tunnel junction traversed by a current $I(t)$ which consists of uncorrelated charge packets corresponding to individual electrons when a fixed voltage is imposed to the junction. Electrons tunnel through the thin layer of insulator sandwiched between the metal electrodes. The junction is represented in circuit schematics by a double box symbol. (b) The tunnel junction is characterized by the tunnel resistance R_t and capacitance C .

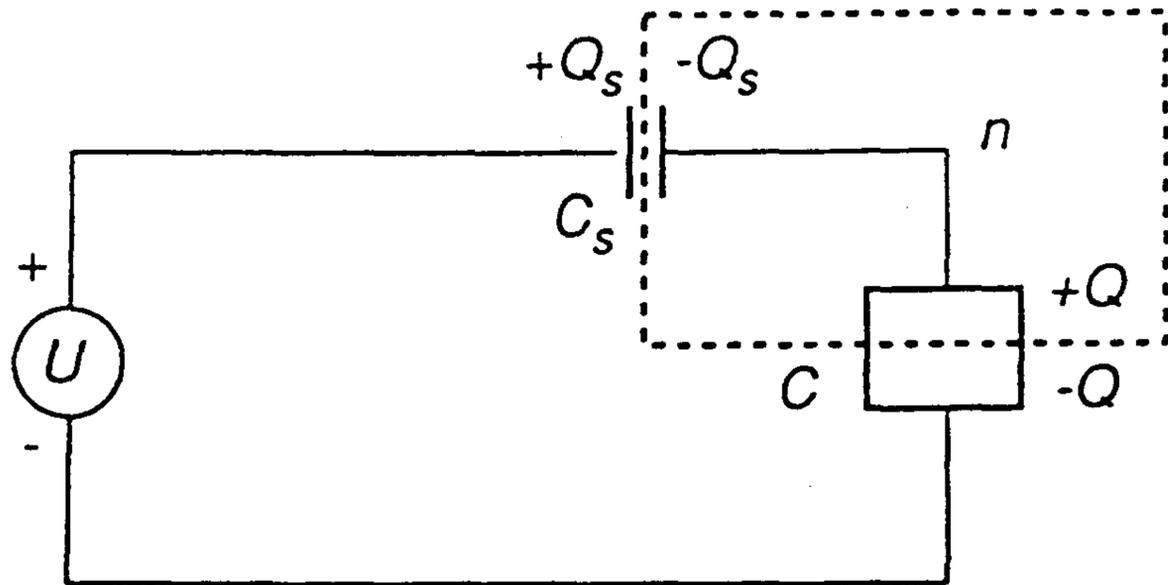
이는 고립된 전극의 초과 전하량 (excess charge)으로 고립된 전극으로는 터널링을 통해서만 전하들이 들어가거나 나올 수 있으므로 $Q-Q_s$ 는 전하량의 정수배, 즉 $Q-Q_s = ne$ 이다. 이때 만약 접합의 크기가 매우 작아 정전기 에너지 $E_c = e^2/2C_\Sigma$ ($C_\Sigma = C+C_s$)의 값이 열에너지 $k_B T$ 보다 훨씬 크다면 E_c 는 접합을 통과하는 전자를 조절할 수 있는 변수가 된다.

그림 3-1-2(a)에서 $U = 0$ 인 경우 E_c 가 열에너지 $k_B T$ 보다 크다면 전자의 접합 통과는 열에너지보다 값이 더 큰 E_c 를 유도하게 되므로 $n = 0$ 이 된다. 그러나 접합에 걸리는 전압 U 가 증가하게 되면 $n = 0$ 과 $n = 1$ state 간의 에너지 차가 줄어들게 된다. 사실 총에너지는 $E = E_c(n-C_s U/e)^2$ 로 주어진다. 그러므로 $U = e/2C_s$ 이면, $n = 0$ 과 $n = 1$ state는 같은 값의 에너지를 갖게되므로 전자는 자유로이 접합을 지나다닐 수 있다. 그러나 U 가 $e/2C_s$ 보다 더 증가하게 되면 $n = 1$ 이 가장 에너지 준위가 낮은 상태가 되며, 이 상태는 $U = e/C_s$ 가 될 때까지 지속된다. $U = e/C_s$ 에서는 $U = 0, n = 0$ 의 상태에서와 같이 전하량 Q 가 0이 된다. 다시 말해 전압이 e/C_s 만큼 증가할 때마다 고립된 전극의 초과 전자량 n 의 값이 1씩 증가하게 된다. 그림 3-1-2(b)는 n 의 평균값 \bar{n} 를 U 의 함수로 나타낸 그림이다. U 와 \bar{n} 의 관계는 계단모양의 함수로 전압 U 를 조절해 줌으로써 \bar{n} 의 값을 정확하게 조절해 줄 수 있다.

그림 3-1-2(b)에서와 같은 각진 계단모양은 절대온도 0 K에서의 이상적인 경우로 온도가 올라가게 되면 계단모양은 둥글게 되며, $k_B T \gg E_c$ 온도영역에서는 계단모양이 없어지고 그림 3-1-2(b)의 점선과 같이 U 와 \bar{n} 의 관계는 직선이 된다. 온도가 50 mK 정도에서 $E_c \gg k_B T$ 의 관계를 만족시키기 위해서는 C_Σ 가 10^{-5} F 이하여야 하며, 이렇게 작은 전기용량을 얻기 위해서는 접합의 크기가 50 nm x 50 nm 정도이어야 한다. 전기용량이 10^{-5} F 인 경우 전자 하나가 접합을 통과하기 위해 필요한 전압은 100 μ m - 1 mV로 쉽게 실험적으로 조절할 수 있는 영역이다.

요약을 하면 극저온에서 접합의 크기가 submicron인 미소접합의 경우 고립된 전극의 초과 전하의 Coulomb 에너지 때문에 전자들이 연속적으로 접합을 통과하지

a



b

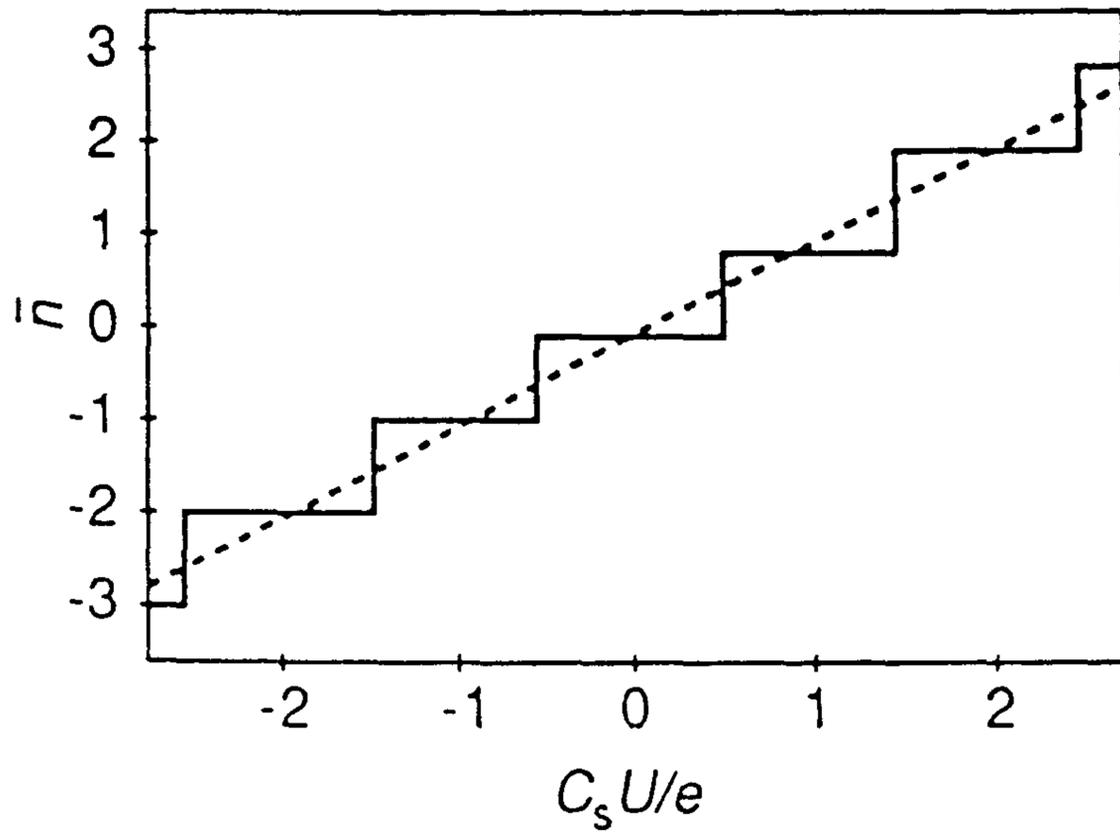


Fig. 3-1-2. (a) Junction biased by a voltage source U in series with a capacitance C_s . The metal electrode between the junction and the capacitance forms an isolated 'island' (box in dashed line) which contains n excess electrons. (b) Variation of \bar{n} , the average of n as a function of U when $k_B T \ll E_c$ (full line) and $k_B T \gg E_c$ (dashed line).

못하고 전자들이 packet으로 접합을 통과한다. 이때 접합을 통과하는 전자의 수는 접합에 걸어 주는 전압에 의해 정확하게 조절되는데 이것을 Single Electron Tunneling이라 한다.

2. Controlled transfer of charges in a circuit

SET의 기본원리는 SET island (고립된 전극)에서의 전자 하나의 정전기 에너지에 의하여 좌우되지만 SET에 흐르는 전하의 흐름은 단전자 수준에서 조절되지 않는다. 실제로 gate voltage U 는 전류의 평균값을 조절한다. 다시말해 전자의 흐름을 전자 하나씩 조절해준다는 것은 U 를 조절해줌으로써 전자를 첫번째 접합으로부터 고립된 전극으로 들어오게 하여 얼마간 그곳에 머물게한 후 두번째 접합을 통해 나가게 한다는 것, 즉 $n = 0$ 의 Coulomb blocked state에서 $n = 1$ 의 Coulomb blocked state로 연속적으로 가게한다는 것을 의미한다. 그러나, 이것은 하나의 고립된 전극만으로는 가능하지 않다. 그 이유는 한 전자를 또다른 전자가 두번째 접합을 통과하지 않게 하면서 첫번째 접합을 통과시킬 수 없기 때문이다. 그러므로 단전자 수준으로 전자의 흐름을 조절해주기 위해서는 적어도 3개의 접합이 필요하다.

그림 3-1-3 (a)는 3개의 접합과 2개의 고립된 전극으로 이루어진 회로이다. SET에서와 같이 이 회로의 state는 각 고립된 전극의 초과 전자수 n_1, n_2 와 각 접합을 통과한 전자수의 합인 charge flow index로 표시될 수 있다. 예를 들어 $(n_1, n_2), (n_1, n_2)^*$ 는 charge flow index의 차이가 1이며, 총에너지의 차이가 eV 인 두 state를 나타낸다.

$V \ll \min(e/C_{\Sigma 1}, e/C_{\Sigma 2})$ 인 경우 두 gate capacitance C_1, C_2 에 걸리는 U_1, U_2 를 조절하여 여러 state의 에너지 값을 변화시킬 수 있다. 여기서 $C_{\Sigma 1}, C_{\Sigma 2}$ 는 두 고립된 전극의 총전기용량이다. $U_1 = e/2C_1, U_2 = e/2C_2$ 일때 state $(0, 0), (1, 0), (0, 1),$ 그리고 $(0, 0)^*$ 의 에너지는 그림 3-1-3 (b)와 같은 에너지 값을 갖으며 이것은 그림 3-1-3 (c)에서와 같이 Coulomb blockade가 제거되어 회로에 전류가 흐르는

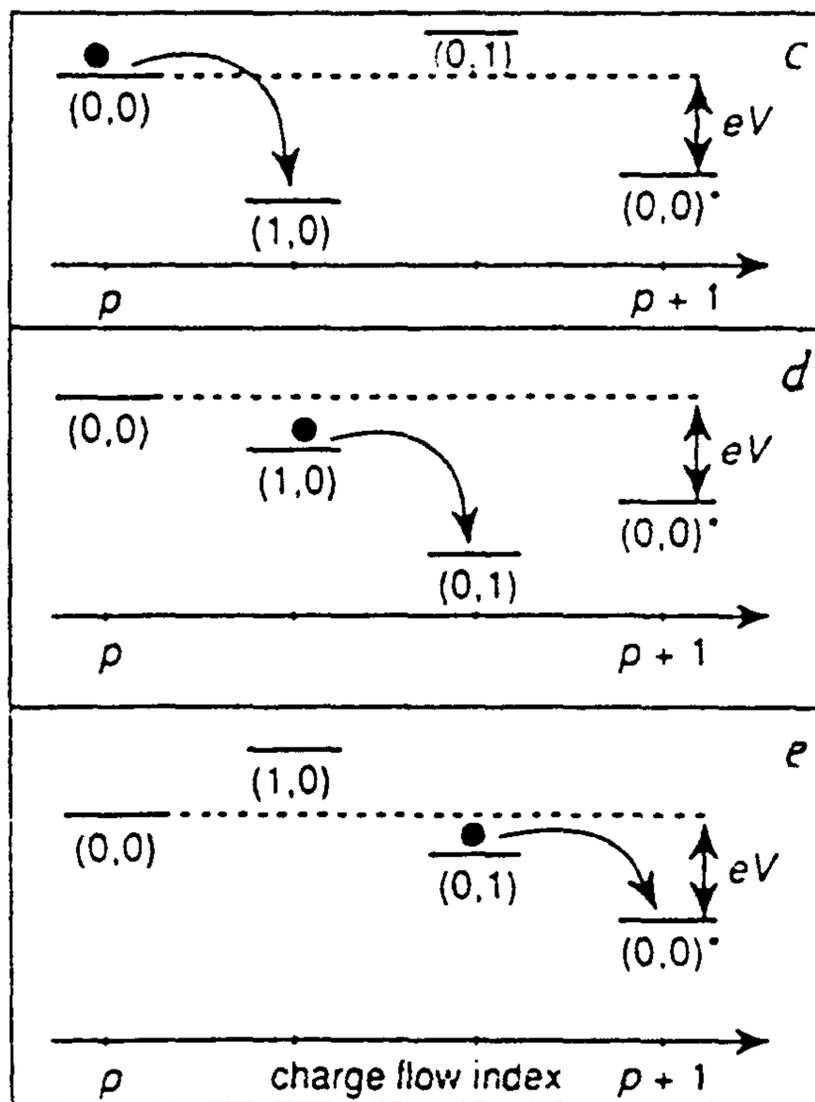
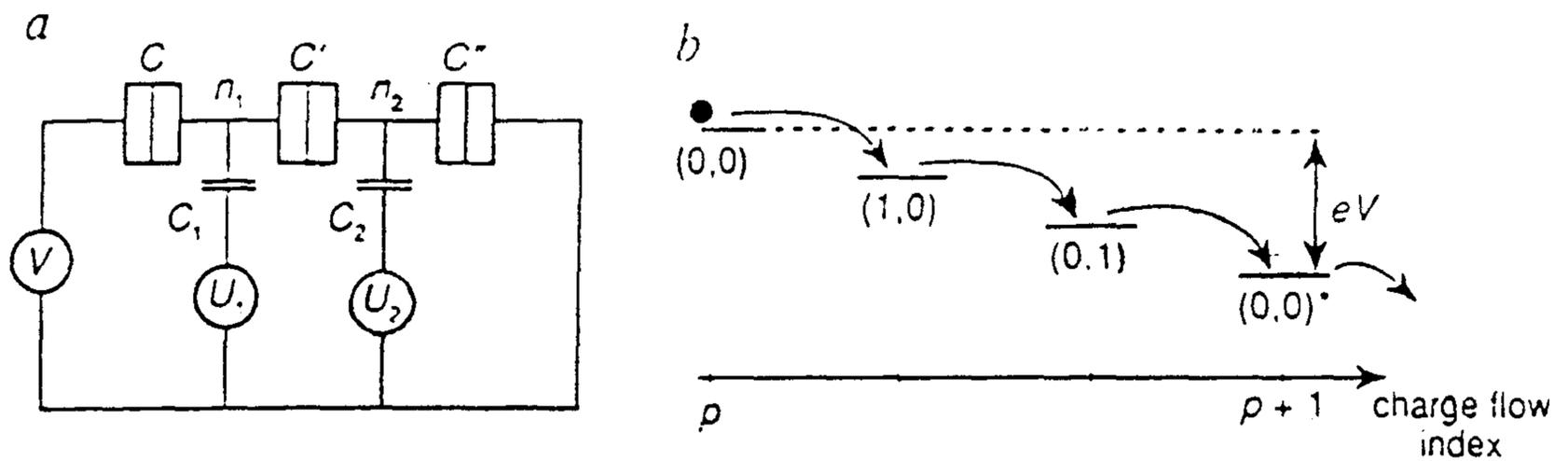


Fig. 3-1-3. (a) Schematic of the single-electron pump, (b) energy states of the circuit when the control voltages U_1 and U_2 are set so that Coulomb blockade is suppressed. (c)-(e) Pumping cycle which transfers one electron around the circuit of (a). It is obtained by superposing two phase-shifted modulation signals on the values of U_1 and U_2 corresponding to (b).

상태와 같게 된다. 그러나 이 경우 2개가 아닌 3개의 접합이 있기 때문에 state (0, 1)과 (1, 0)이 중간단계로 존재하게되며, 이 중간단계는 (0, 0) 혹은 (0, 0)* 에너지 보다 낮아지게되면 전류가 흐르지 않는 blocked state가 된다. 그럼 다음의 경우를 생각해 보자. (1, 0)과 (0, 1)의 에너지가 (0, 0)와 (0, 0)*의 에너지 보다 낮아 고립된 전극에 초과 전자가 존재하지않은 blocked state의 회로가 있다. U_1 의 값을 증가시키면 (1, 0)의 에너지가 (0, 0)과 (0, 1)의 에너지 보다 낮아지게 된다. 따라서 전자 하나가 맨 왼쪽의 접합을 통과하여 첫번째 고립된 전극에 전자가 하나 있는 blocked state가 된다 (그림 3-1-3 (c)). 다음에는 U_1 의 값을 낮추고 U_2 의 값을 증가시켜보자. 이번에는 (0, 1)의 에너지가 (1, 0), (0, 0)*의 에너지보다 낮아져 전자가 중간접합을 통과하면서 두번째 고립된 전극에 전자가 하나 있는 또다른 blocked state가 된다 (그림 3-1-3 (d)). 마지막으로 다시 U_2 의 값을 낮추면 (0, 1)의 에너지가 (0, 0)*의 에너지 보다 커지므로 전자가 가장 오른쪽 접합을 통과하므로써 회로는 맨처음의 blocked state로 돌아간다 (그림 3-1-3 (e)). 또한 (0, 0)과 (0, 0)*의 에너지 차이인 eV 가 (0, 1)과 (1, 0)의 에너지 차이보다 작을 경우 transport voltage V 의 극을 바꾸면 같은 modulation cycle이 전자들은 같은 방향으로 계속 흐르게 한다. 따라서 그림 3-1-3 (a)와 같이 3개의 접합으로 이루어진 소자를 single-electron 'pump'라 한다.

Single-electron 'pump'의 실제 작동은 그림 3-1-4 (a)와 (b)와 같다. U_1 과 U_2 를 최대 zero-voltage conductance에 해당하는 $U_1^{dc} = e/C_1$ 과 $U_2^{dc} = e/C_2$ 가 되게하면 주파수는 f 로 같으나 위상이 $\phi \approx \pi/2$ 만큼 차이가 나는 두개의 주기적인 신호가 U_1^{dc} 과 U_2^{dc} 에 중첩되게된다. 따라서 그림 3-1-3 (c), (d), (e)과 같은 cycle이 일어나고, 그림 3-1-4 (a)에서 보는 것과 같은 current plateau가 생기게된다. 전류의 방향은 위상을 ϕ 에서 $\phi + \pi$ 로 바꾸어주므로써 쉽게 바꿀 수 있다. 이때도 마찬가지로 current plateau가 관측되나 전류의 값은 그 부호가 바뀌게 된다. 그림 3-1-4 (b)는 plateau의 크기를 주파수의 함수로 나타낸 것이다. $I = ef$ 의 관계가 잘 성립됨을 볼 수 있다.

3개의 접합으로 이루어진 single-electron 'pump'에서는 gate voltage가 2개 필요

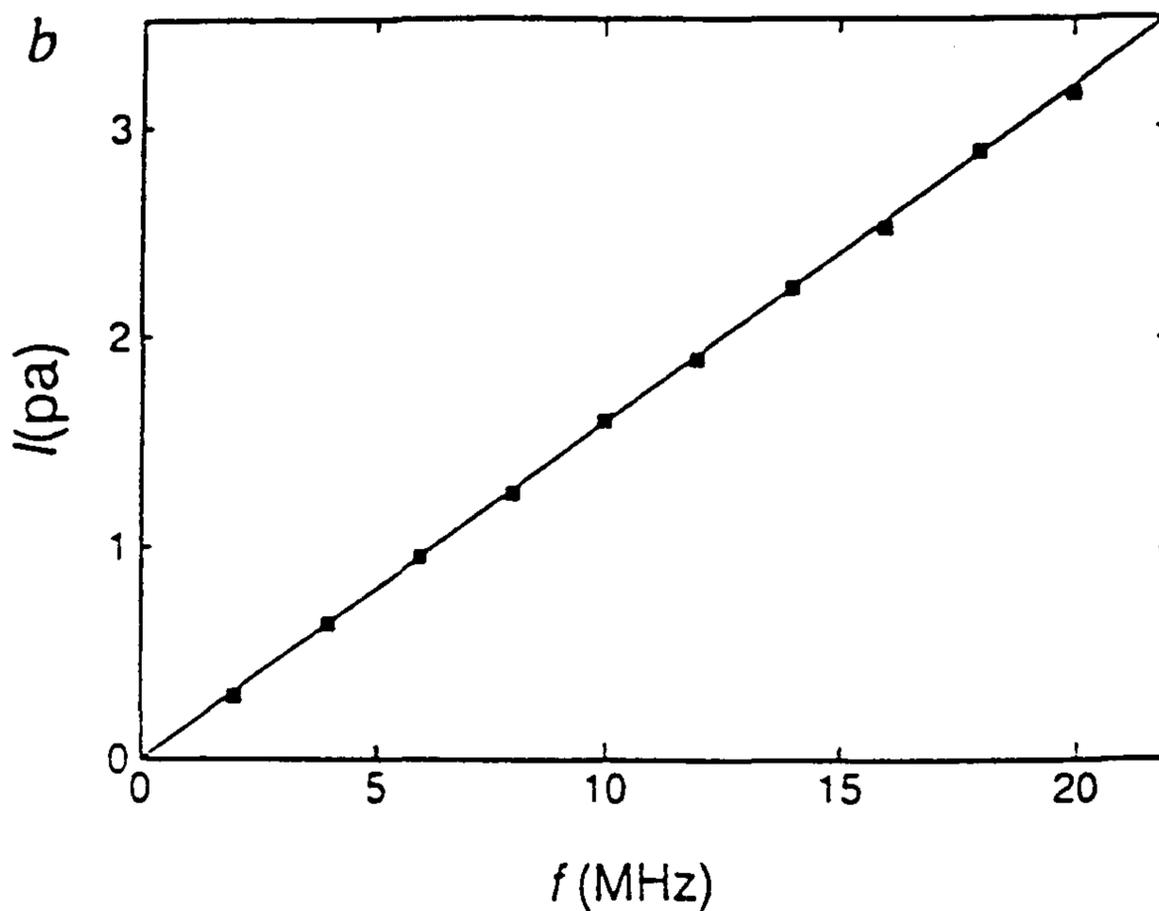
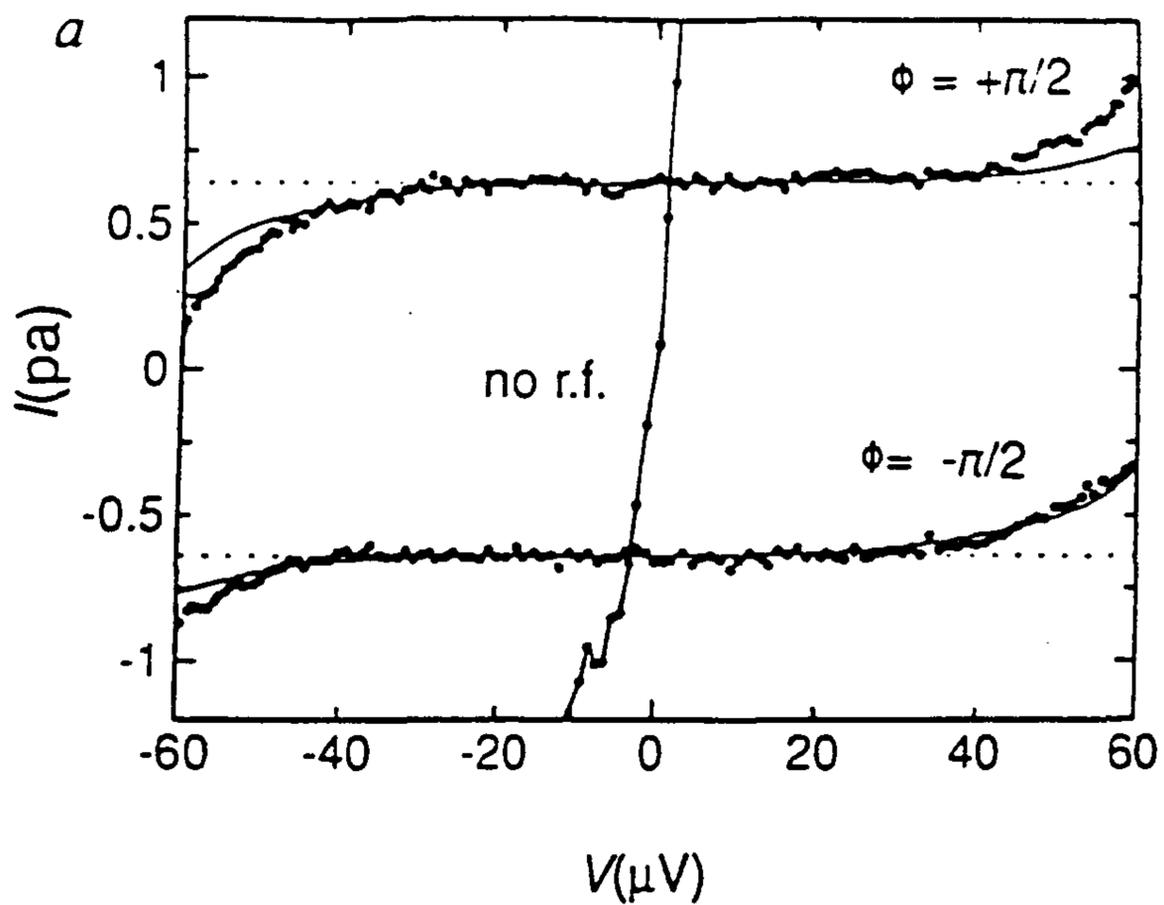


Fig. 3-1-4. (a) I-V characteristic of the pump with and without a 4 MHz control voltage modulation. The two modulation signals were phase-shifted by ϕ . Dashed lines indicate $I = \pm ef$. Full lines are the result of numerical simulations taking into account quantum fluctuations of the island electron number. (b) Current measured at the inflexion point of the current plateau as a function of the frequency f . Full line is $I = ef$.

하다. 그러나, 4개의 접합으로 이루어진 그림 3-1-5 (a)에서와 같은 single-electron 'turnstile'에서는 한개의 gate voltage 만으로도 전자가 하나씩 이동할 수 있게 조절하는 것이 가능하다. 'turnstile'은 접합 전기용량의 약 1/2 쯤 되는 gate capacitance가 중앙에 연결되어있는 SET와 유사하다. turnstile 중간에 고립된 전극들은 SET에서 $C_g U = e/2$ 일때 일어나는 stochastic conductance를 상쇄시켜주는 energy barrier 구실을 해준다(그림 3-1-3 (b), (c), (d)). 중앙의 고립된 전극에 초과 전자가 없을 경우 U를 증가시켜주면 비록 중앙의 고립된 전극에 전자가 하나 있는 상태가 가장 낮은 에너지 준위를 계속 차지하기는 하나 모든 중간 state들의 에너지는 감소하게되며, 그 결과 전자 하나가 중앙의 고립된 전극으로 들어가게 된다. 이제 다시 U를 감소시키면 중간 state들의 모든 에너지가 증가하게되어 더 이상 중앙의 고립된 전극에 전자가 하나있는 상태가 가장 낮은 상태가 아니므로 전자는 중앙의 고립된 전극을 떠나게된다(그림 3-1-3 (d)). 따라서 pump에서와 마찬가지로 turnstile에서도 $I = ef$ 의 전류가 생성된다. 그러나 turnstile에서는 pump에서와는 달리 전류의 방향을 바꿀 수 없으며, 전류의 방향은 bias voltage V의 부호에 의하여 결정된다.

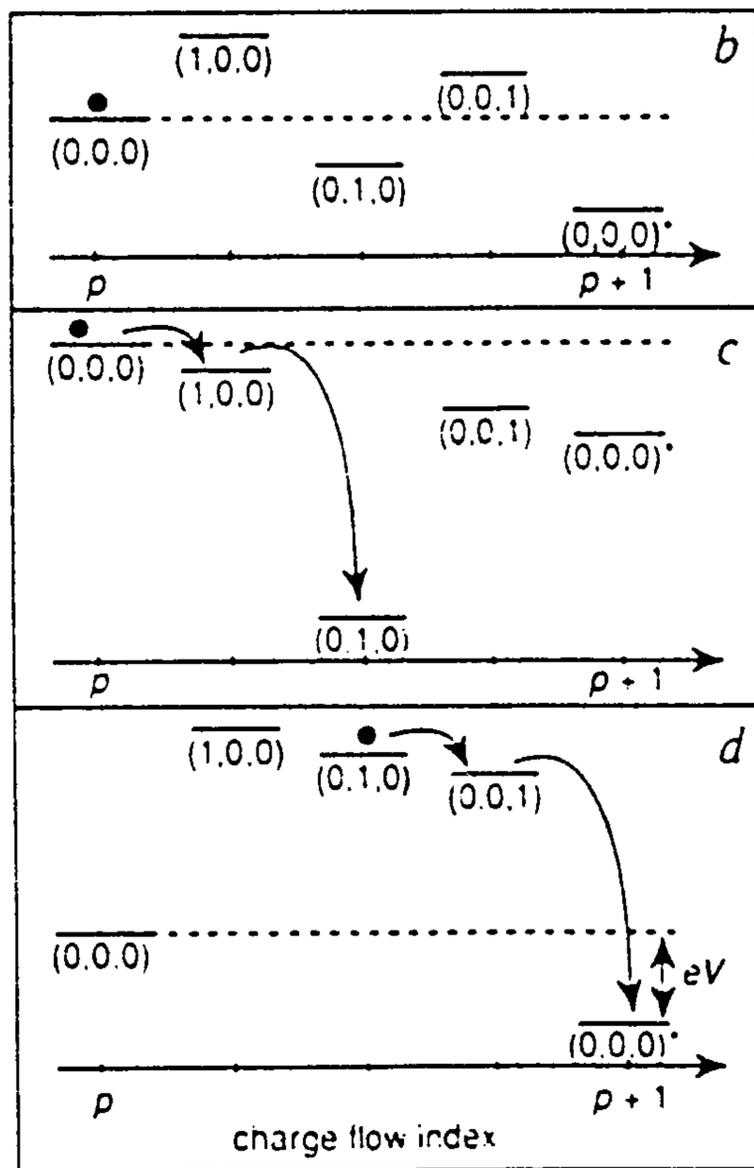
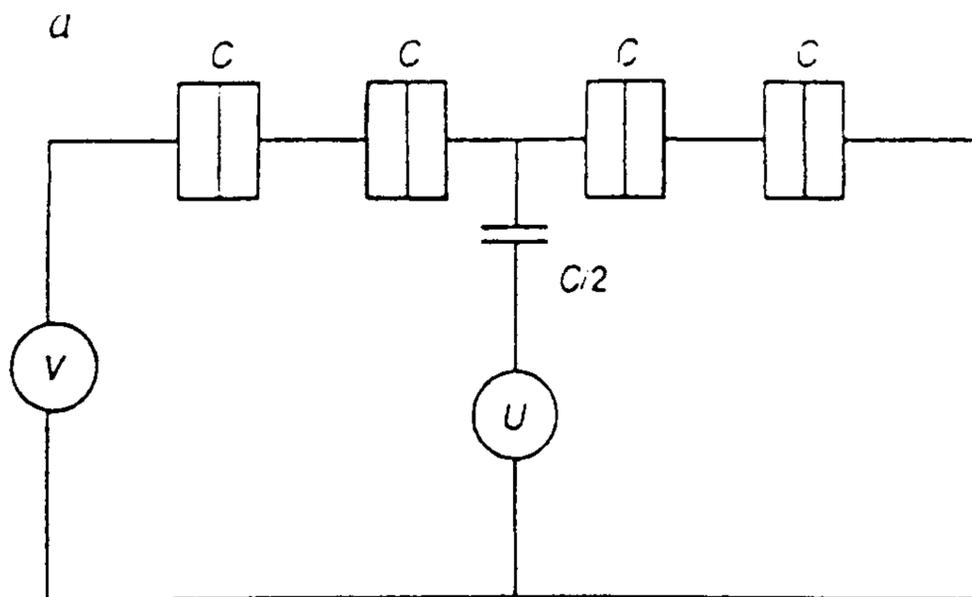


Fig. 3-1-5. (a) Schematic of single-electron turnstile. (b)-(d) Turnstile cycle which is obtained by modulating the control voltage U and which transfers one electron around the circuit of (a).

제 2 절 전자빔을 이용한 미소가공 기술 연구

전자빔 식각이란 전자빔을 이용하여 리지스트를 노광시켜 원하는 패턴을 제작하는 것으로 광식각 기술과 비교하여 mask가 필요없고, 또한 sub- μm 선폭의 미세 패턴을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 전자빔 식각 장치는 너무 고가의 장비이므로 본연구에서는 주사형 전자현미경에 전자빔을 조절하여 패턴을 그릴 수 있는 장치를 부착하여 전자빔 식각을 시도하기 위해 주사형 전자현미경을 설치하였다.

본장에서는 주사형 전자현미경의 원리중 전자빔 식각에 직접 영향을 미치는 부분, 즉 전자빔의 생성, 전자빔 전류의 안정성, 그리고 전자빔의 편향에 대해 알아보고, 전자산란이 전자빔 식각에 미치는 영향을 Monte Carlo 방법을 이용하여 계산한 결과를 보고하겠다. 그리고 마지막 절에서는 본연구에서 설치한 주사형 현미경의 사양 및 시험결과에 대해 간단히 기술하겠다.

1. 주사형 전자현미경의 원리

가. 전자빔의 생성

전자빔은 전자총으로 부터 방출되는데 전자총에는 열음극과 field emission 두 종류가 있다. 그러나, 본연구에서 설치한 주사형 전자현미경의 전자총은 열음극 형태이므로 여기서는 열음극 전자총으로 부터 생성되는 전자빔에 대해서만 알아보겠다.

그림 3-2-1에서 보는 바와 같이 음극(cathode)을 가열해 주면 전자의 에너지가 work function보다 크게되므로 음극으로부터 진공중으로 전자들이 방출된다. 음극은 주로 hair pin 형태의 W이나 LaB_6 tip으로 이루어져있는데 W 필라멘트의 수명은 2-40 시간인 반면, LaB_6 tip의 수명은 200 시간 이상이다. 그러나 LaB_6 tip을 사용하기 위해서는 진공도가 10^{-6} Torr 보다 좋아야 하므로 별도의 ion pump가 필요

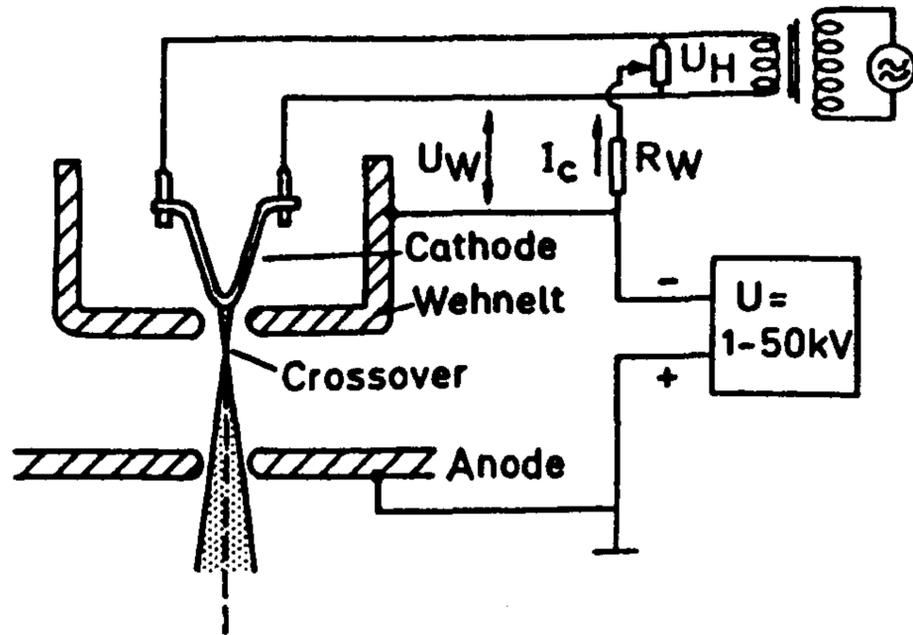


Fig. 3-2-1. Thermionic electron gun consisting of cathode, Wehnelt cup and anode. The Wehnelt bias U_w is provided by the voltage drop of the emission current I_c across R_w .

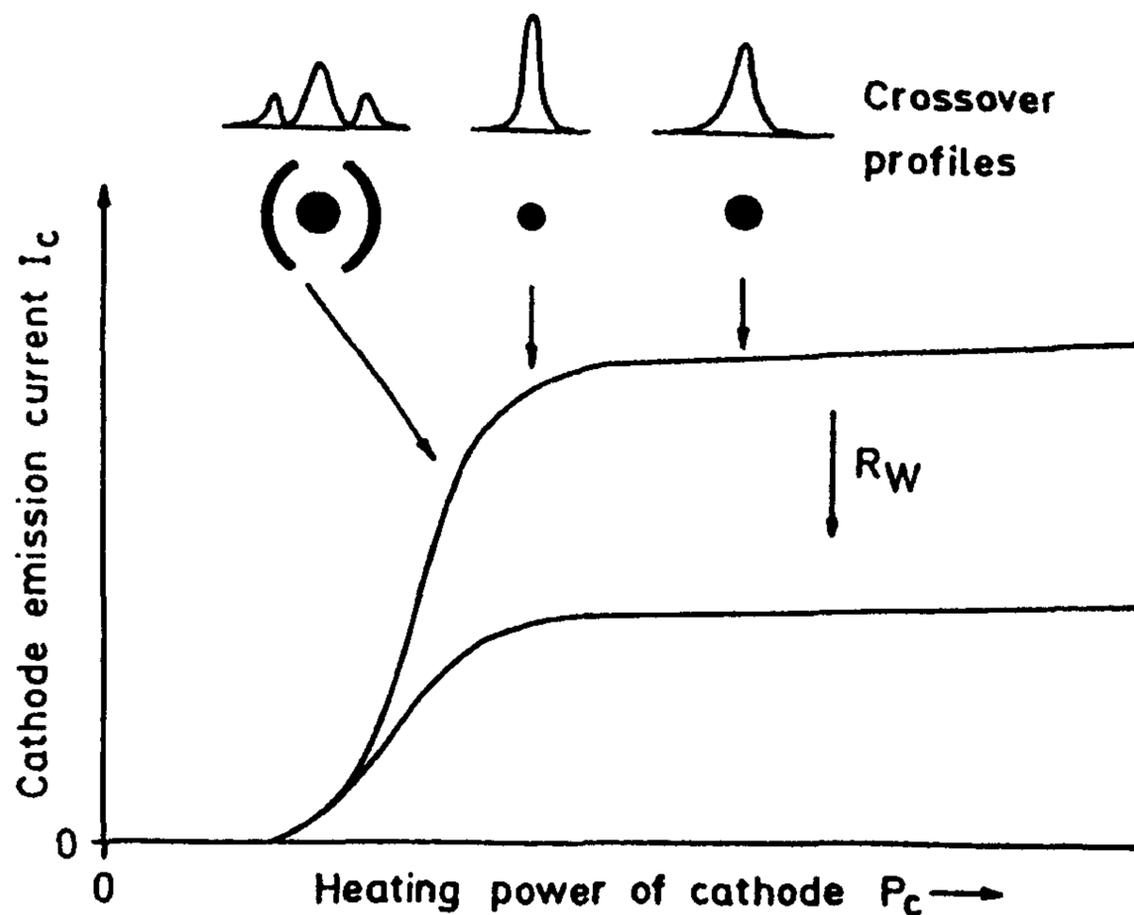


Fig. 3-2-2. Cathode emission current I_c versus cathode heating power P_c for a self-biased thermionic electron gun and typical profiles of the crossover at three working points.

하다.

음극으로부터 방출된 전자들은 음극과 양극(anode) 사이에 걸린 전압 U 에 의해 가속되기 이전에 음극으로 bias된 Wehnelt cup에 의해 음극의 tip 쪽으로 집속된다. 이때 negative bias는 1-10 M Ω 의 R_w 에 걸리는 전압 $U_w = I_c R_w$ 에 의하여 조절된다. 전류빔 전류 I_c 와 음극의 heating power P_c 의 관계는 그림 3-2-2와 같다. 빔이 가장 잘 집속되는 최적조건은 I_c 가 saturation 되기 바로 전 상태이다. 이 최적상태보다 P_c 를 더 증가시키면 음극이 과열되어 필라멘트의 수명이 단축되며, 전자빔의 집속도 나빠진다. 반면 P_c 가 최적 상태의 값보다 낮으면 가운데가 빈 hollow 형태의 전자빔이 생성된다.

나. 전자빔 전류의 안정화

주사형 전자현미경에 관련된 전류로는 cathode-emission current I_c , electron-probe current I_p , 그리고 specimen current I_s , 3종류가 있다.

열음극으로부터 방출되는 전자들에 의한 전류 I_c 는 음극 tip의 온도에 따라 매우 민감하게 바뀐다. I_c 의 단기 안정도는 음극을 가열해주는 교류전류원의 주파수를 10 kHz 이상으로 올려주므로써 이를 수 있다. 그러나, I_c 는 음극 tip과 Wehnelt cup의 서로 다른 열팽창 계수로 인한 tip과 Wehnelt cup간의 거리 변화, 텅스텐 필라멘트의 얇아짐, 혹은 work function의 변화에 따라 달라지므로 시간에 따라 약간씩 drift한다.

전자빔 식각에 있어 매우 중요한 변수인 probe 전류 I_p 는 Faraday cup을 이용하여 정확하게 측정할 수 있으며, I_p 는 tip 위치의 작은 변화로 인한 전자총 alignment의 깨짐 혹은 column의 charging 효과 때문에 I_c 가 일정하더라도 변할 수 있다. 그러므로 I_p 의 안정화를 위해 여러가지 방법이 고안되었는데 대부분의 방법은 I_p 에 비례하는 신호를 feedback시켜 I_p 가 일정한 값을 갖도록하는 것이다. I_c 의 값은 음극의 가열전압, Wehnelt cup의 bias 전압, 혹은 렌즈의 excitation 등을 변화시키므로써 바꿀 수 있다.

마지막으로 specimen 전류 I_s 는 시료에서의 전류로 I_p 가 일정하더라도 시료의 오염 상태나 charging으로 인해 바뀌어질 수 있다.

다. 전자빔의 편향

전자빔을 주사(scanning)하거나 일시적으로 차단(blanking)하기 위한 전자빔의 편향은 전기장이나 자기장을 걸어주므로써 얻을 수 있다. 그림 3-2-3에서와 같이 전자가 전기장 $|E| = u/d$ 과 자기장 B 가 걸린 평행한 금속판으로 이루어진 capacitor 내를 통과하면 전자의 z -방향 운동량은 $p_z = mv$ 로 주어지며, x -방향의

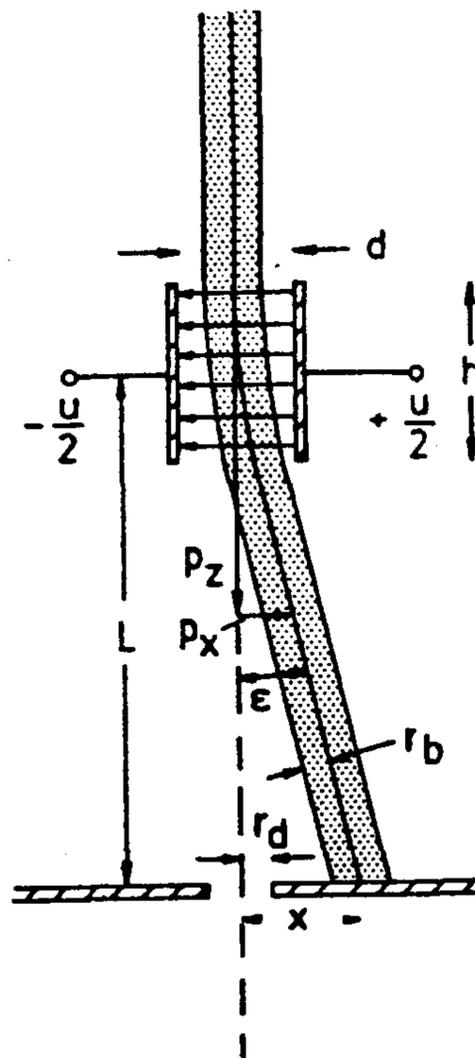


Fig. 3-2-3. Electron deflection through an angle ϵ by the transverse electric field of a parallel-plate capacitor across a diaphragm for beam blanking.

운동량은

$$p_x = \int_T^0 F_x dt = e \int_T^0 (E_x + vB_y) dt = \frac{e}{v} \int_h^0 (E_x + vB_y) dz = eh \left(\frac{E_x}{v} + B_y \right) \quad (3-2-1)$$

가 된다. 여기서 h 는 capacitor의 길이이며, v 는 전자의 속도, $T = e/v$ 는 전자가 capacitor를 통과하는데 걸리는 시간이다. 식 (3-2-1)로부터 전기장으로 인한 편향 각 $\varepsilon \approx x/L = |p_x|/p_z$ 는

$$\varepsilon = \frac{eh}{mv^2} B_y = \frac{h}{2d} \frac{u}{U} \frac{1 + E/E_0}{1 + E/2E_0} \quad (3-2-2)$$

로 주어지며, 자기장을 걸어주었을 때는 ε 가

$$\varepsilon = \frac{eh}{mv} B_y = \frac{ehB_y}{[2m_0 E(1 + E/2E_0)]^{1/2}} \quad (3-2-3)$$

가 된다. 여기서 U 는 음극과 양극에 걸리는 가속전압이다.

예를 들어 capacitor의 사양이 $h = 1 \text{ cm}$, $d = 2 \text{ mm}$, $u = \pm 2 \text{ kV}$ 인 경우 식 (3-2-2)에 의하면 20 keV 전자빔을 5° 편향시키기 위해서는 $|E| = 20 \text{ kV/cm}^2$ 이 필요하다. 그러나 같은 조건일 때 자기장은 $B = 10^{-2} \text{ T}$ 가 필요하다. 이것은 자기장을 이용한 scan generator가 더 간단하게 설계될 수 있다는 것을 의미한다 할 수 있겠다. 그러나 자기장의 경우는 편향시킬 수 있는 주기가 100 MHz인 반면 전기장을 이용한 경우는 10 GHz 이상으로 제작할 수 있으므로 빠른 전자빔의 주사나 차단이 필요한 경우에는 일반적으로 전기장을 이용한다.

2. 전자 산란이 전자빔 식각에 미치는 영향

전자빔 식각은 전자들이 resist의 화학결합을 깨뜨리므로서 이루어진다. 그러나, 전자가 resist와 기판에 입사되면 전자는 resist와 기판 내에서의 산란과 2차 전자

의 생성으로 실제 원하는 패턴 보다 더 선평이 넓은 패턴이 노광된다. 본절에서는 전자 산란에 대해 간략히 알아보고, 이 전자 산란이 전자빔 식각에 미치는 영향을 Monte Carlo 방법을 이용하여 계산해 보았다.

가. 전자 산란

그림 3-2-4는 물질 내로 입사된 전자의 산란을 정성적으로 나타낸 그림이다. Resist는 입사전자 뿐만 아니라 기판으로부터 산란된 전자에 의해서도 노광된다. 입사전자빔이 resist를 통과할 때 일어나는 전방 산란은 좁은 노광분포를 보이는 반면, 기판으로부터 산란된 후방산란전자는 비교적 넓은 면적을 노광시킨다. 일반적으로 가우시안 분포를 보이는 총 노광분포는

$$F_p(r) = k [\exp - (r/\sigma_f)^2 + \eta(\sigma_f/\sigma_b)^2 \exp - (r/\sigma_b)^2] \quad (3-2-4)$$

로 주어진다. 여기서 r 은 노광분포 중심으로부터의 거리, η 는 후방산란전자에 의한 노광과 입사전자에 의한 노광 간의 비, 그리고 k 는 normalizing 상수이다.

그림 3-2-5는 가속전압이 10, 25, 50 kV 일때의 전방산란에 의한 노광분포와 후방산란에 의한 노광분포를 나타낸 것이다. 가속전압이 클수록 전방산란에 의한 전방산란에 의한 노광분포의 폭이 좁아지며, 후방산란에 의한 노광분포는 점점 더 spread되어 background만 나타난다. 그러므로 후방산란은 드문드문 떨어져있는 패턴에는 거의 영향을 미치지 않으나 밀집되어있는 패턴에는 근접 효과 (Proximity effect)를 통해 영향을 미친다.

나. 전자 산란의 Monte Carlo 계산

전자가 resist와 기판에 입사되었을 때 resist 노광에 영향을 주는 후방산란전자와 2차전자의 궤적을 추적하여 2차전자와 후방산란전자의 전자생성율을 Monte Carlo 방법으로 계산하였다^[6,7]. 후방전자산란은 Love, Bishop, Myklebus가 사용했던 다중산란 모델을 이용하여 계산하였다. 이 모델은 오직 탄성충돌 만이 중요한

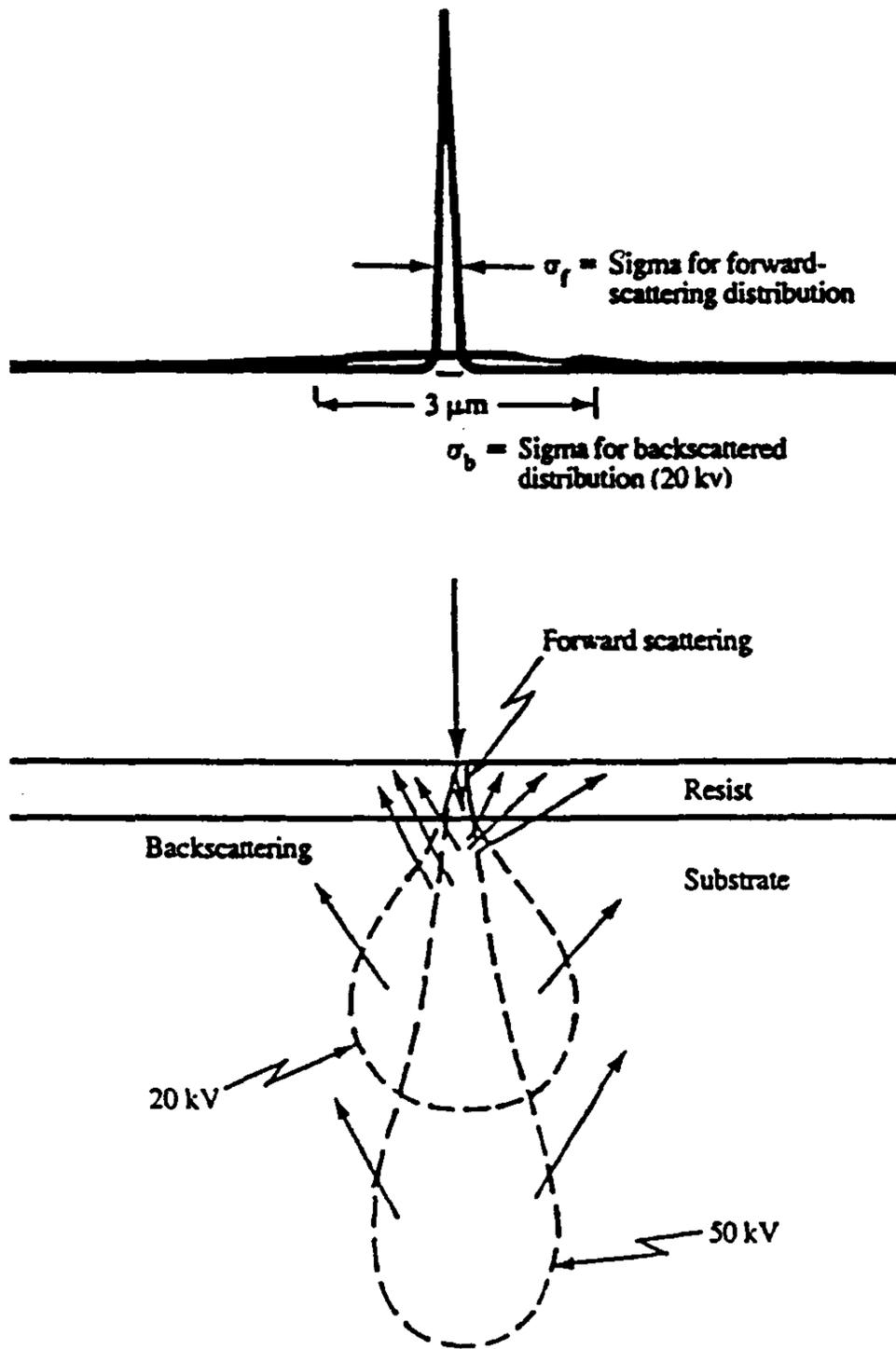


Fig. 3-2-4. Electron scattering in electron resist exposure. The curves at the top of the figures show the exposure distributions due to the incident and backscattered electrons.

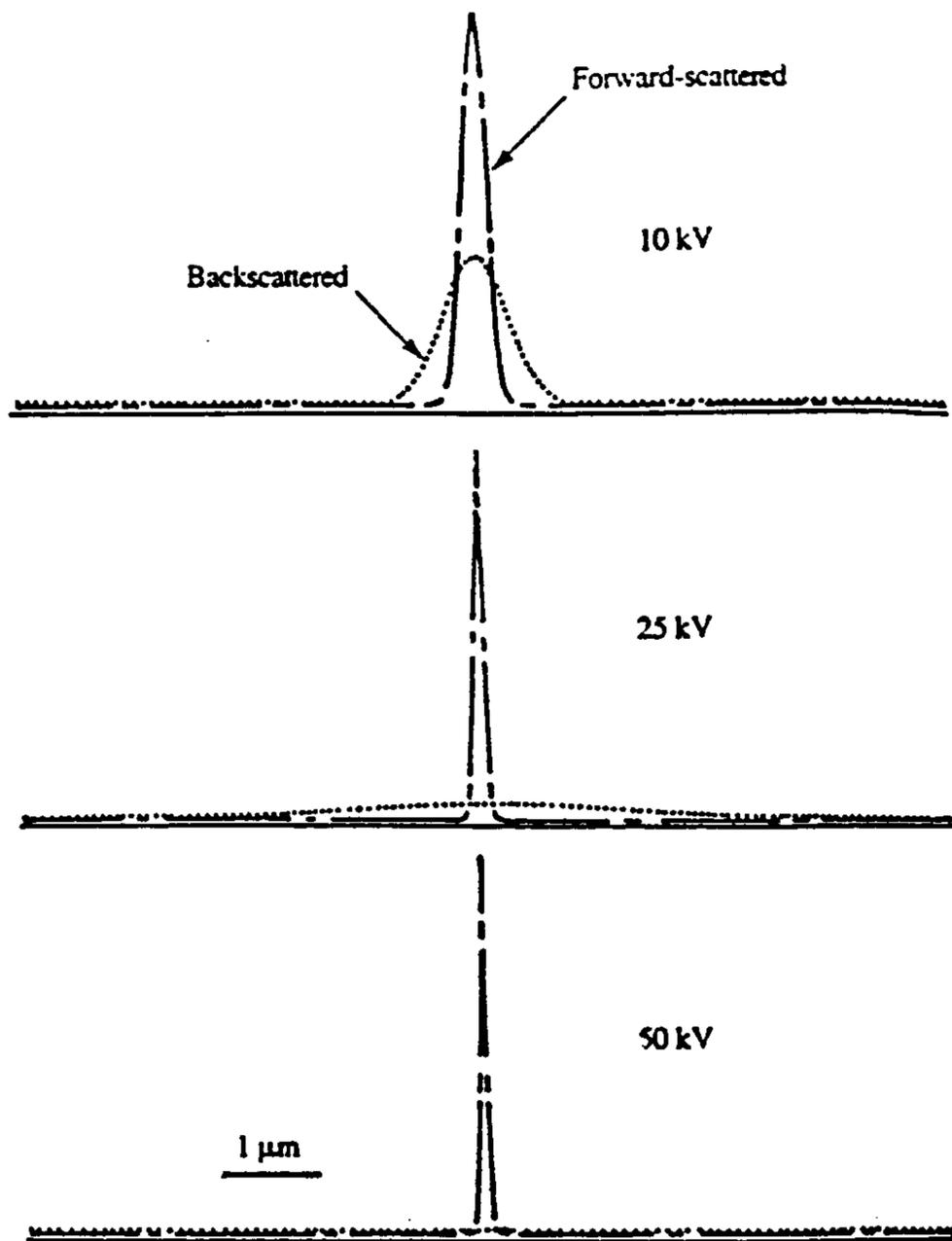


Fig. 3-2-5. Exposure distributions for a 1 μm -thick resist layer on a Si substrate for 10 kV, 25 kV, and 50 kV electrons.

의미를 갖고 있으며, 입사전자의 에너지는 연속적이라기 보다는 단속적으로 잃어버린다는 것을 가정한 것이다. 매질에 입사한 전자가 진행하는 거리 Bethe range R_B 는 다음과 같이 stopping power (dE/ds)의 항으로 표시된다.

$$R_B = \int_{1.03J}^{E_0} \frac{-1}{dE/ds} dE \quad (3-2-5)$$

여기서 stopping power인 dE/ds 는 매질 안에서 전자가 단위길이 당 (엄밀한 의미로 매질의 밀도와 길이의 곱) 잃어버린 에너지를 나타내는 것으로

$$\frac{dE}{ds} = - \frac{78.500z}{EA} \ln(1.16 \frac{E}{J}) keV \frac{cm^2}{g} \quad (3-2-6)$$

E_0 : 입사전자의 에너지 (keV)

E : 매질 속에서의 전자 에너지 (keV)

s : mass length (g/cm^2)

z : 원자번호

A : 원자량 (g/mol)

J : 평균 ionization 에너지

로 주어진다. 여러 충돌 과정을 거쳐 전자가 R_B 에 도달하거나 시료의 표면 밖으로 방출될 때 까지 반복을 하면 1개의 전자가 어떤 궤적을 갖는지 계산할 수 있다. 본 연구에서는 수 %의 정확도를 얻기위해 5000개에 대한 전자 궤적을 계산하였다.

2차전자는 주로 입사전자에 의해 발생되기 때문에 입사전자의 궤적을 추적하면서 2차전자의 생성 가능성과 2차전자가 표면 밖으로 방출될 확률을 계산하여야 한다. 입사전자가 i 번째 단계에서 잃게되는 에너지는 식 (3-2-7)이 되며, 이로써 생성되는 2차전자의 수 $n(z, E)$ 는 식 (3-2-8)과 같다.

$$E(i) = E(i+1) = \int \frac{dE}{ds} ds \quad (3-2-7)$$

$$n(z, E) = \frac{1}{\varepsilon} (E(i) - E(i+1)) \quad (3-2-8)$$

여기서 ε 는 2차전자 1개를 생성시키는데에 필요한 에너지이다.

한편, i 번째 단계에서의 시작점과 끝점의 위치를 z_i, z_{i+1} 이라 하고, 충돌 단계에서 균일한 비율로 2차전자가 생성된다고 가정하면 생성된 2차전자가 표면 밖으로 방출될 확률 $P(z_i, z_{i+1})$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P(z_i, z_{i+1}) = A \frac{\lambda}{z_{i+1} - z_i} [\exp(-z_i/\lambda) - \exp(-z_{i+1}/\lambda)] \quad (3-2-9)$$

여기서 A 는 0.5 정도의 상수이고, λ 는 특성감쇄길이로 수 nm 수준이다. 따라서 i 단계에서 2차전자가 발생될 확률 δ_i 는 식 (3-2-7)과 (3-2-8)의 곱이 된다.

$$\delta_i = \frac{1}{\varepsilon} (E(i) - E(i+1)) \frac{A\lambda}{z_{i+1} - z_i} [\exp(-z_i/\lambda) - \exp(-z_{i+1}/\lambda)] \quad (3-2-10)$$

따라서 입사전자의 궤적을 조사하면서 각 단계에서의 2차전자 방출확률 δ_i 를 계산하면 2차전자의 총 생성율을 구할 수 있다.

본연구의 Monte Carlo 계산에서는 입사전자의 궤적을 추적함으로써 매질과 상호 충돌작용을 하는 정보 영역과 시료에서 방출되는 후방산란전자와 2차전자의 생성율을 입사전자의 에너지에 따라 계산하였다. 이때 입사전자는 단일 매질 윗면의 한 지점에서 전자들이 수직으로 입사된다고 가정하였으며, 입사전자의 공간 분포를 가우시안 형태로 전자선의 직경을 4 nm로 하였다 (이 직경 내에 입사전자가 존재할 확률은 80%이다). 프로그램은 C 언어로 작성하였으며, Compac 386과 80387 floating point coprocessor를 사용하여 1초에 약 8개의 전자 궤적을 추적하였다. 한

편 계산의 오차를 최소화하기 위하여 각 지점 당 5000개의 전자를 입사시켰다.

그림 3-2-6은 Monte Carlo 방법으로 계산한 입사전자의 궤적, 즉 매질과 상호충돌작용을 하는 interaction volume을 나타낸 그림이다. 입사전자의 에너지가 10 kV 이하인 경우에는 전자산란이 표면 부분에서만 일어나는 반면, 10 kV에서는 깊이는 얇고 산란분포의 넓이는 커져서 근접효과가 가장 크게 나타난다. 그러나, 10 kV 이상에서는 에너지가 높아짐에 따라 산란각이 작아져 입사전자가 수평방향 보다는 수직방향으로 산란이 잘된다. 그림 3-2-7은 후방산란전자가 어떤 기하학적 분포를 갖고 패턴에 영향을 주는가를 입사전자의 가속전압을 2, 5, 10, 30 kV로 바꾸어가며 계산한 결과이다. 후방산란전자는 다중산란을 하였기 때문에 입사전자의 가속전압이 증가할수록 완만한 분포를 갖는다. 반면 2차전자는 입사전자에 의해 생성되는 확률이 크기 때문에 입사전자와 비슷한 분포를 갖게된다. 따라서 근접효과를 최소화하기 위해서는 입사전자의 가속전압이 높아야한다.

3. 주사형 전자 현미경의 설치

전자빔 식각을 위해 본연구에서는 일본 JEOL사에서 제작한 주사형 전자현미경 (JSM-6400)을 설치하였다. JSM-6400의 사양은 다음과 같다.

가. 분해능

- o 2차전자 image (SEI) :

 - 3.5 nm 보장 (working distance (W.D.) = 8 mm, 가속전압 = 35 kV)

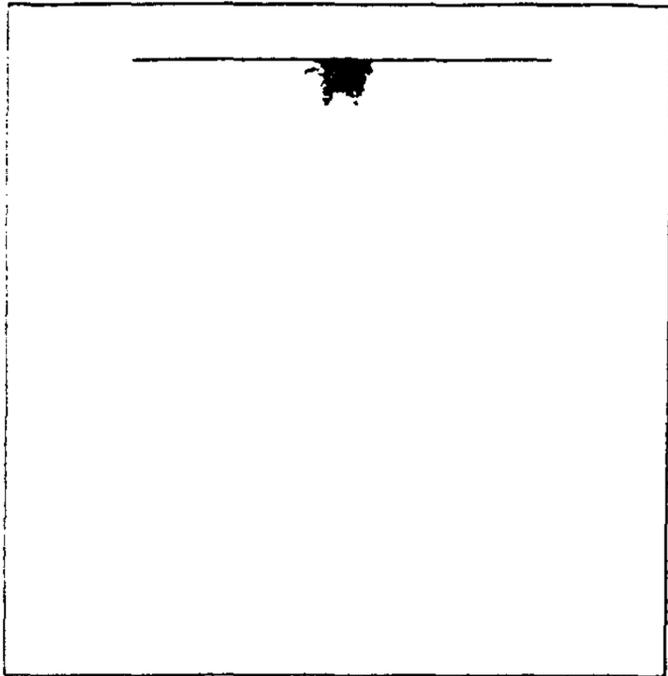
 - 10.0 nm 보장 (W.D. = 39 mm, 가속전압 = 35 kV)

- o 후방산란전자 image (BEI) :

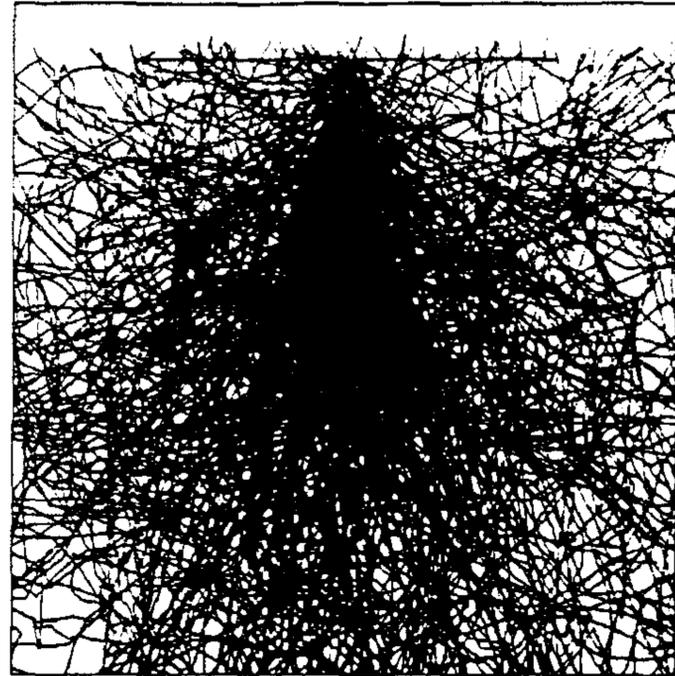
 - 10 nm 가능 (W.D. = 8 mm, 가속전압 = 35 kV)

- o 배율 : x 10 (W.D. = 39 mm) to 300,000

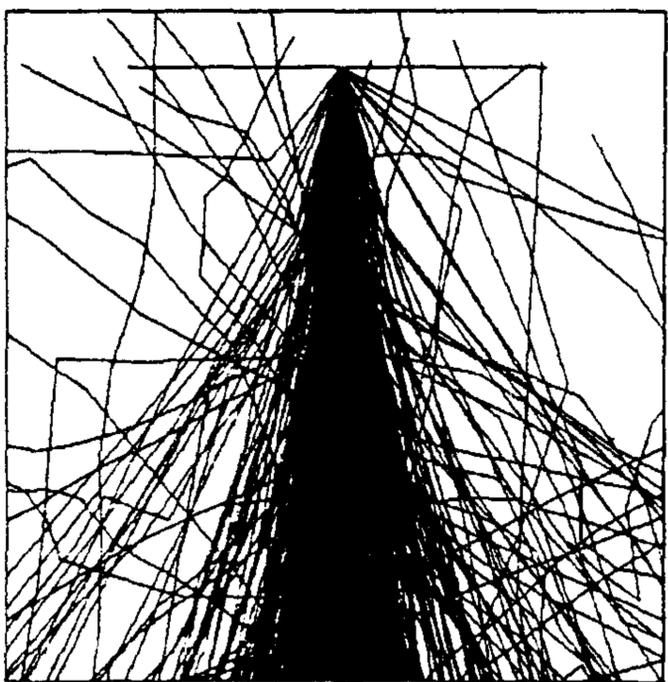
- o Electron probe :



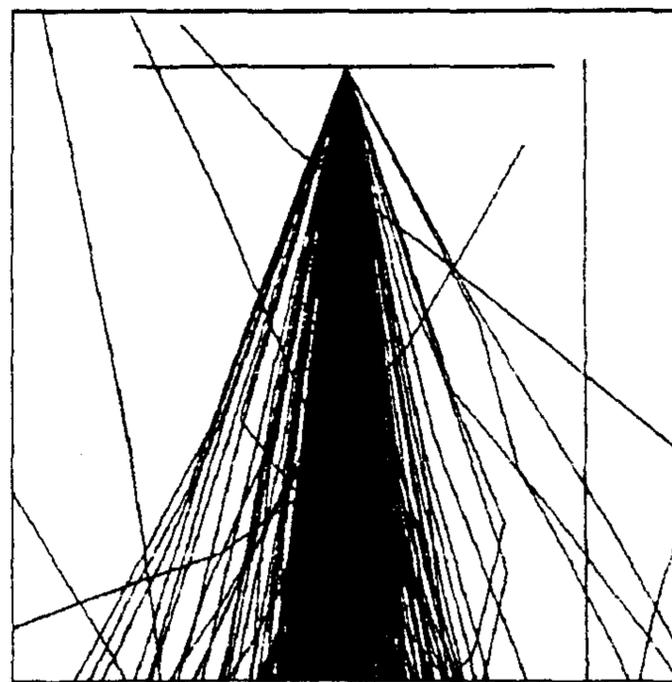
(a) 2 kV



(b) 10 kV



(c) 20 kV



(d) 30 kV

Fig. 3-2-6. Electron trajectories calculated using the Monte Carlo simulation as a function of incident beam energy: (a) 2 kV, (b) 10 kV, (c) 20 kV, and (d) 30 kV.

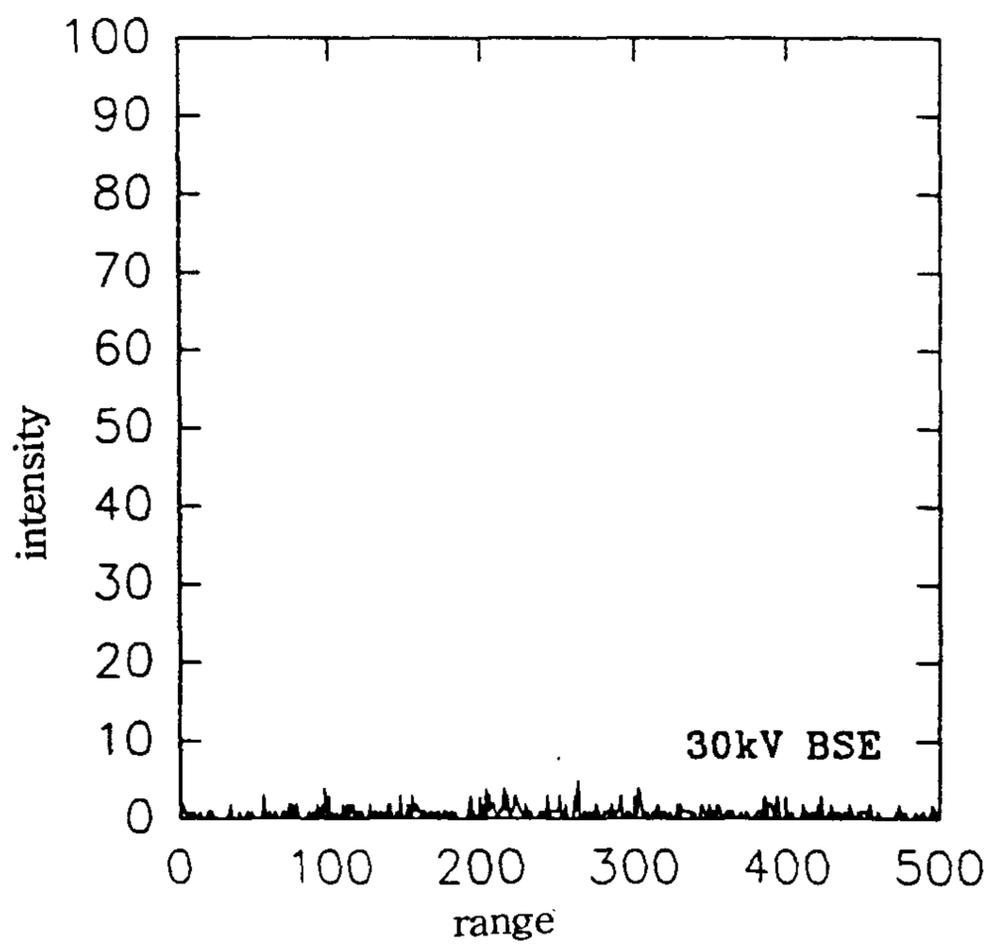
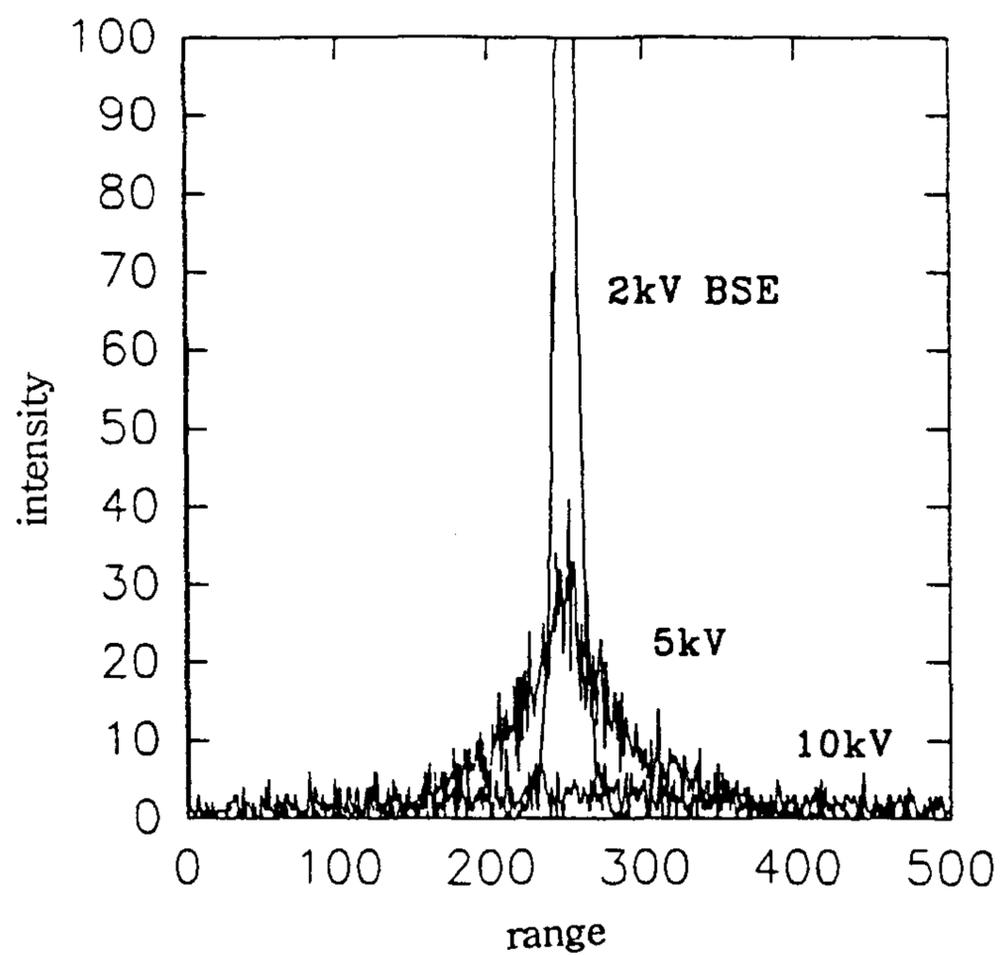


Fig. 3-2-7. Distributions of backscattered electron energy at different incident beam energies, 2, 5, 10, 30 kV.

가속전압 : 0.2 - 40 kV
0.2 - 5 kV (100 V steps)
5 - 40 kV (1 kV steps)
전류 : 10^{-5} - 10^{-7} A

나. 전자 광학 시스템

o 전자총

Bias 전압 : Self-bias
필라멘트 : W hairpin 필라멘트
양극 (anode) : 거리 조절 가능
Emission 전류 : Meter readout

다. Specimen Stage

- o 형태 : Fully eccentric goniometer stage
- o 이동가능 거리 :
X=50 mm, Y=70 mm, Z=40 mm
T(tilt) = -5° - $+90^{\circ}$, R(rotation)= 360° endless
- o 시료 교환: Airlock type (up to 32 mm dia.) and draw-out type
- o Absorbed current measuring terminal : Built-in

라. 전자 검출 시스템

- o 2차전자 image :
검출기 : collector, scientillator, light guide and photo-multiplier tube로 구성
Collector bias : 가속전압과 W.D. 변화에 따라 바뀜
2차전자 가속전압 : 10 kV

o 후방산란전자 image :

Mode : composition image and topography image

검출기 : Si P-N 접합

Operable range : W.D. = 8-15 mm, probe 전류 = 10^{-11} A 이상

마. 주사 시스템

o Scanning modes :

PIC : full frame scan

RD2, RD4 : selected area scan (1/2 frame size, 1/4 frame size)

RDC : selected area scan (any of 1/2 - 1/20 frame size)

LSP : line scan for profile display

BUT : bright-up cursor display

SPT : for spot positioning

o 주사 속도 : 0.0167 - 640 ms/line

바. Beamblanking

o Type : electromgnetic deflection

o Response bandwidth : dc to 0.7 MHz at 0.2 - 0.4 kV

o Rise time : 약 0.5 μ s (0.7 MHz에 해당)

o Fall time : 약 0.5 μ s (0.7 MHz에 해당)

o Delay for startup : 0.9 μ s 이하

그림 3-2-8은 설치된 주사형 전자 현미경의 성능을 시험하기 위하여 여러가지 시료의 상을 측정한 결과이다. 전자빔 식각을 위해 주사형 전자 현미경에 부착하여야 하는 writing system은 독일 Raith사로부터 구매하였으며 6월 중에 설치될 예정이다.

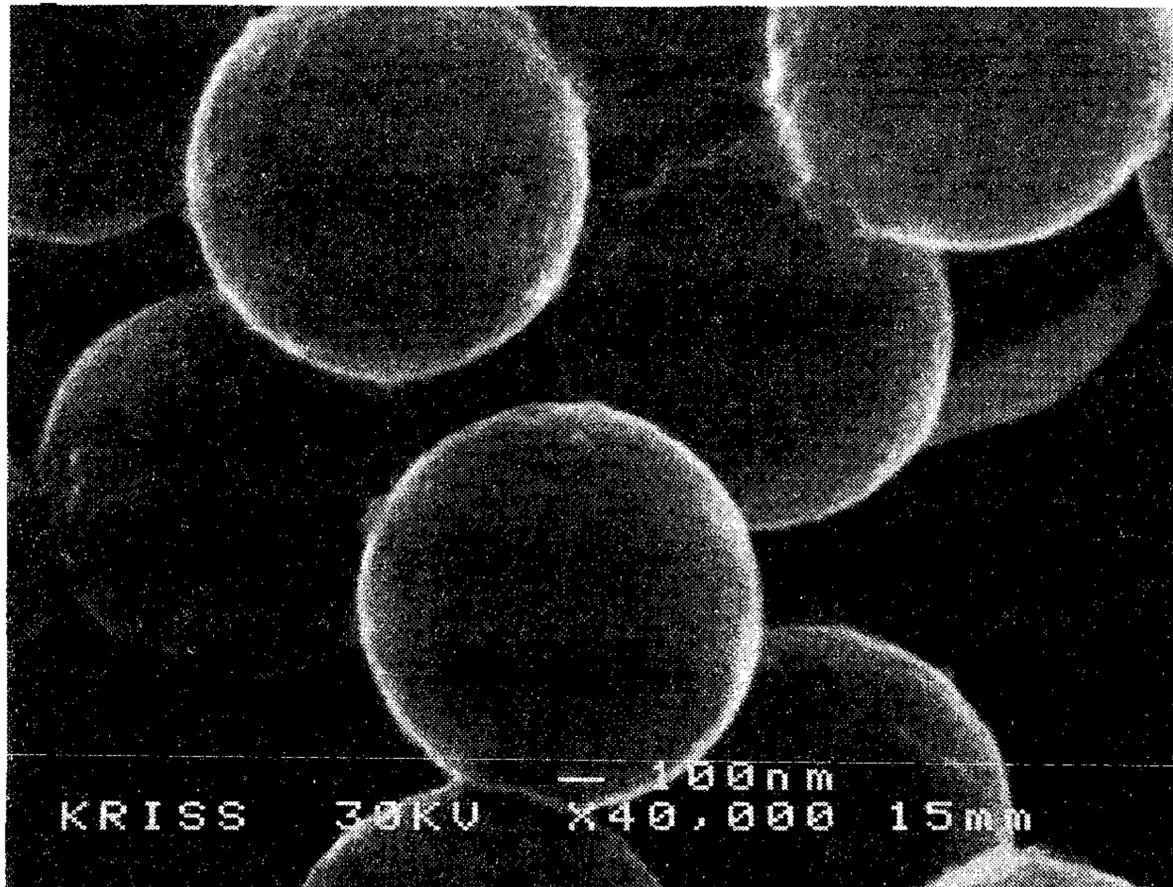
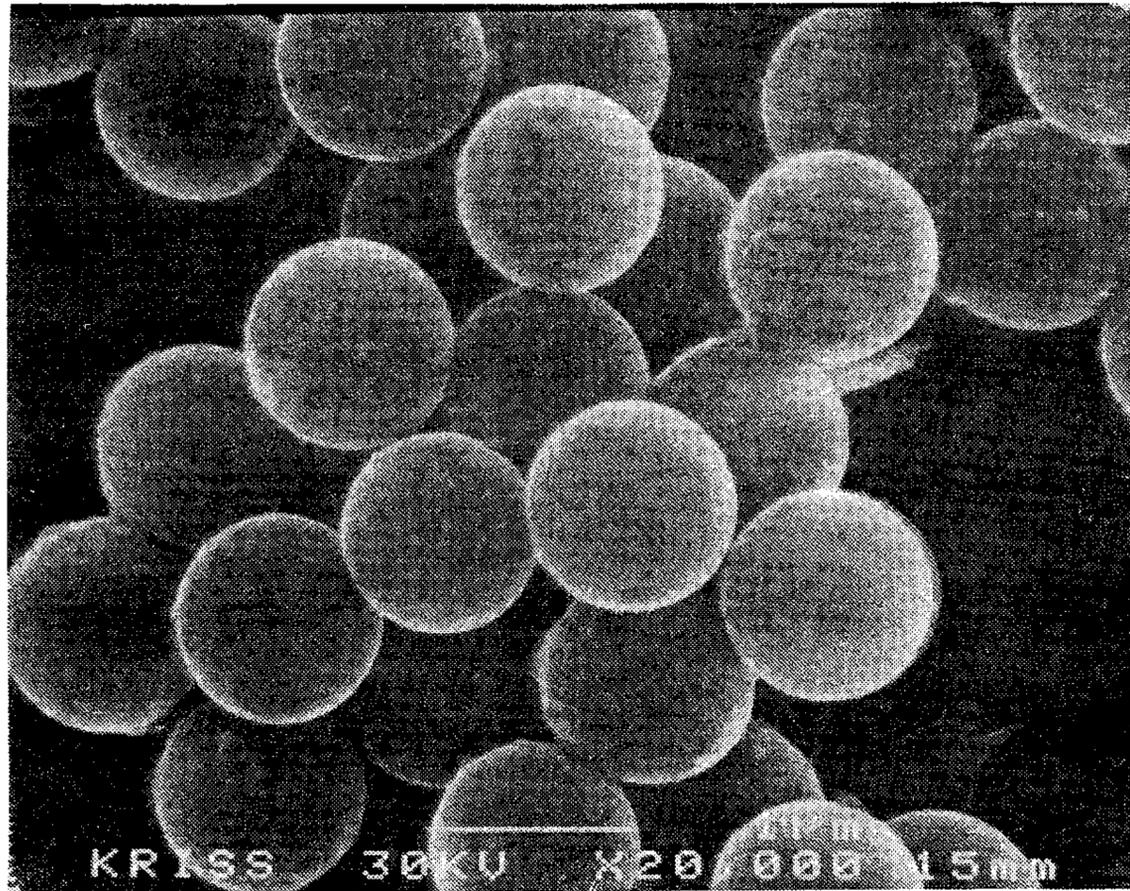


Fig. 3-2-8. SEM (JEOL 6400) test images of Latex cells.

제 3 절 Aharonov-Bohm 효과 소자 제작 및 특성 조사

본 연구의 최종목표는 미소접합의 제작이지만 미소접합은 공정이 비교적 복잡하므로 1차년도에는 전자빔 식각의 최적조건을 찾기위해 mesoscopic device 중 가장 간단한 구조를 갖고 있는 고리 모양의 Aharonov-Bohm (AB) 소자를 Si 기판 위에 제작하여 극저온 하에서 AB 소자의 특성을 조사하였다.

AB 소자는 전류원 및 전압계 연결시 필요한 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 크기의 전극과 $1 \mu\text{m}$ 미만 크기의 고리모양 소자로 이루어져 있다. 그러나 크기가 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 인 전극은 노광속도가 느린 전자빔 식각으로 제작하기에는 장시간이 소요되기 때문에 전극과 전자빔 식각시 소자의 위치를 찾는 데 필요한 align key는 광식각 기술을 이용하여 제작하였다.

그림 3-3-1에서 보는 바와 같은 전극과 align key는 다음과 같은 두가지 방법으로 제작을 시도하였다. 첫번째는 image reversal process와 lift-off를 이용한 방법으로 lift-off에 필요한 negative slope을 얻을 수 있는 image reversal의 자세한 과정은 그림 3-3-2와 같다. Lift-off를 위해서는 제작된 패턴에 전자빔 증착장치를 이용하여 Ti을 약 50 Å 증착시킨 후 Au를 150 - 200 Å의 두께 정도 증착시켰다. 금속 증착 후에는 기판을 아세톤에 담가 photoresist를 제거하였다. 그러나 이 방법은 전극의 가장자리에 residual photoresist가 남아 소자와 전극 간의 연결을 방해하여 많은 경우 소자와 전극이 전기적으로 잘 연결되지 않았다.

두번째 방법은 residual photoresist가 남는 것을 피하기 위해 먼저 Si 기판 위에 전자빔 증착장치를 이용하여 Ti (50 Å)과 Au (200 Å)를 증착시킨 후 광리소그라피와 ion milling을 이용하여 전극과 align key 이외의 부분을 깎아내는 것이었다. 그러나, 이 방법도 항상 신뢰성 있는 전극과 소자의 연결을 만들어내지는 못하였다. 전극과 소자의 연결시 가장 문제가 되는 것은 residual photoresist의 두께에 비하여 소자를 이루는 금속의 두께가 얇다는 것이었다. 그러나, 미소접합 제작시에는 접합을 이루는 금속의 두께가 약 $1 \mu\text{m}$ 정도 될 것으로 예상되므로 전극과 소자의 연결이 큰 문제가 안될 것으로 생각되어 좀더 신뢰성있는 전극과 소자의 연결 제

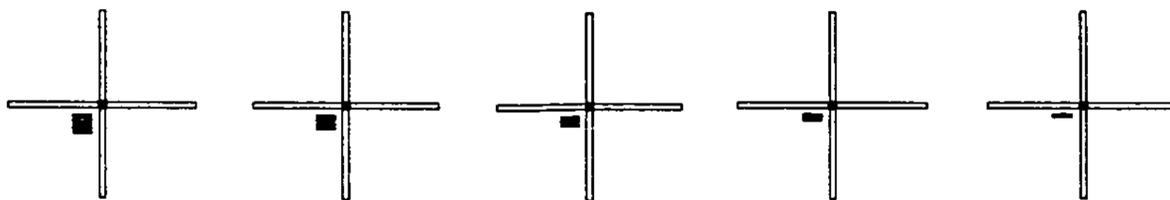
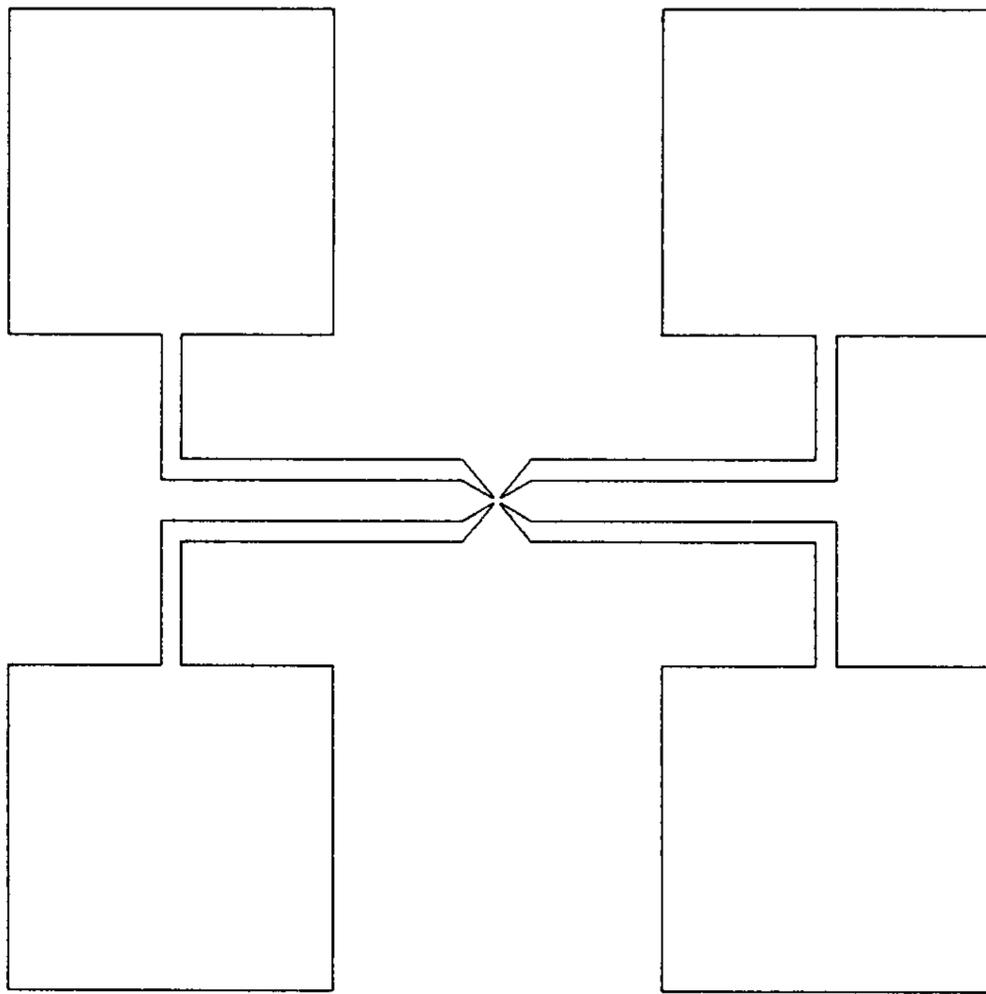
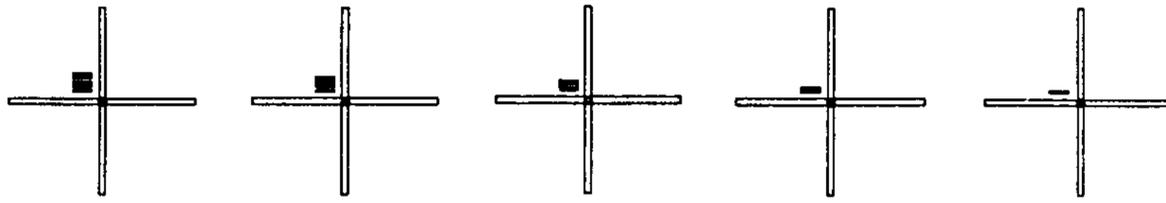


Fig. 3-3-1. Probes and align keys for Aharanov-Bohm devices

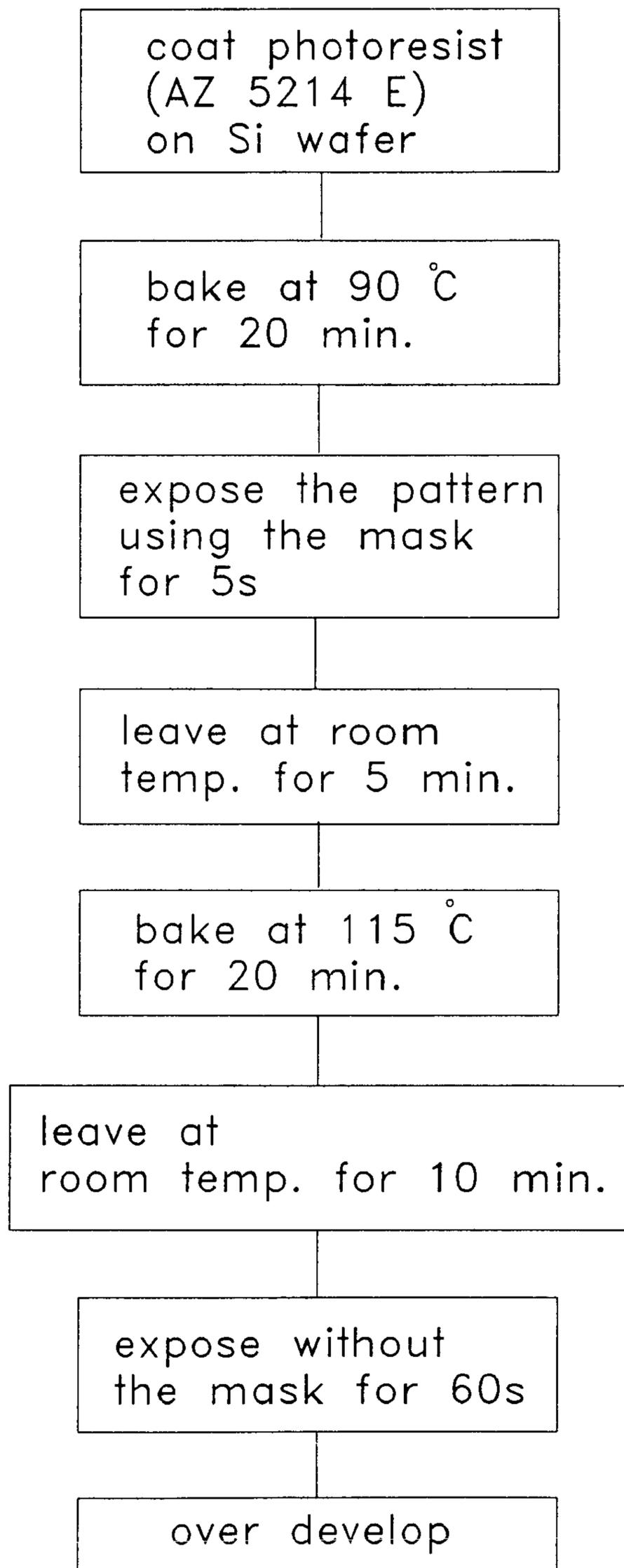


Fig. 3-3-2. Fabrication process of image reversal

작방법을 시도하지 않았다.

고리모양의 Aharonov-Bohm 소자는 KAIST 보유의 전자빔 식각 (일본 Elionix 사의 ELS3300) 장비를 이용하여 이미 전극과 align key 들이 제작된 Si 기판 위에 제작되었다. 전자빔 식각용 resist로는 PMMA와 Co-PMMA 이중 resist를 사용하였다. PMMA 아래에 Co-PMMA resist를 사용한 이유는 Co-PMMA resist가 PMMA 보다 전자빔에 대한 sensitivity가 좋고 분자량이 작아 용매에 쉽게 용해되므로 lift-off에 필요한 negative slope를 쉽게 얻을 수 있기 때문이었다. 전자빔 식각시 전자빔의 가속전압은 30 kV, dose 량은 $14.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 하였다.

Lift-off를 위해서는 패턴이 develop된 기판 위에 noble metal인 Pd, Ag와 semi-metal인 Sb 등을 전자빔 증착장치를 이용하여 증착하였으며, 금속 박막 증착 후 PMMA와 Co-PMMA resist는 아세톤에 담가 제거하였다. 그림 3-3-3은 제작된 Ag AB 소자를 SEM으로 관찰한 결과이다. 그림 3-3-3 소자의 경우 원래 그리고자 했던 소자의 크기는 안쪽 사각형 변의 길이가 $1 \mu\text{m}$, 선폭이 $0.1 \mu\text{m}$ 였으나 제작된 소자는 안쪽 사각형의 변의 길이가 $0.9 \mu\text{m}$, 선폭이 $0.2 - 0.27 \mu\text{m}$ 였다. 선폭이 넓어진 이유는 전자빔 식각시 근접효과를 보정해주지 않았기 때문이라고 생각된다.

AB 효과는 그림 3-3-4와 같은 저주파 교류 측정장치를 이용하여 측정하였다. 소자에 흘려주는 전류는 주파수 33 Hz, $V_{pp} = 1-10 \text{ mV}$ 의 전압을 $1 \text{ M}\Omega$ 의 저항에 연결하여 10-100 nA가 흐르게 하였다. 소자에 걸리는 전압은 AB 측정 정확도를 높이기 위해 소자의 저항값과 비슷한 저항값을 갖는 decade 저항을 소자와 직렬로 연결하여 각각 10 배씩 증폭시키고 증폭된 전압차를 lock-in amplifier (PAR 5210)로 측정하였다. 측정시 자기장의 sweep rate는 초당 약 0.05 G였다.

그림 3-3-5 (a), (b), (c)는 각각 Sb, Ag, Pd으로 이루어진 AB 소자의 자기저항을 온도 20 mK와 150 mK에서 측정한 결과이다. 본 연구에서 mK 수준의 극저온은 $^3\text{He}/^4\text{He}$ dilution refrigerator를 이용하여 생성하였다. $B = 0$ 일때 사각형 고리모양의 Sb 소자는 안쪽 사각형의 변의 길이가 $0.91 \mu\text{m}$, 선폭이 $0.14-0.17 \mu\text{m}$, 저항이 226Ω 이었으며, Ag 소자는 안쪽 사각형의 변의 길이가 $0.9 \mu\text{m}$, 선폭이 $0.2-0.3$

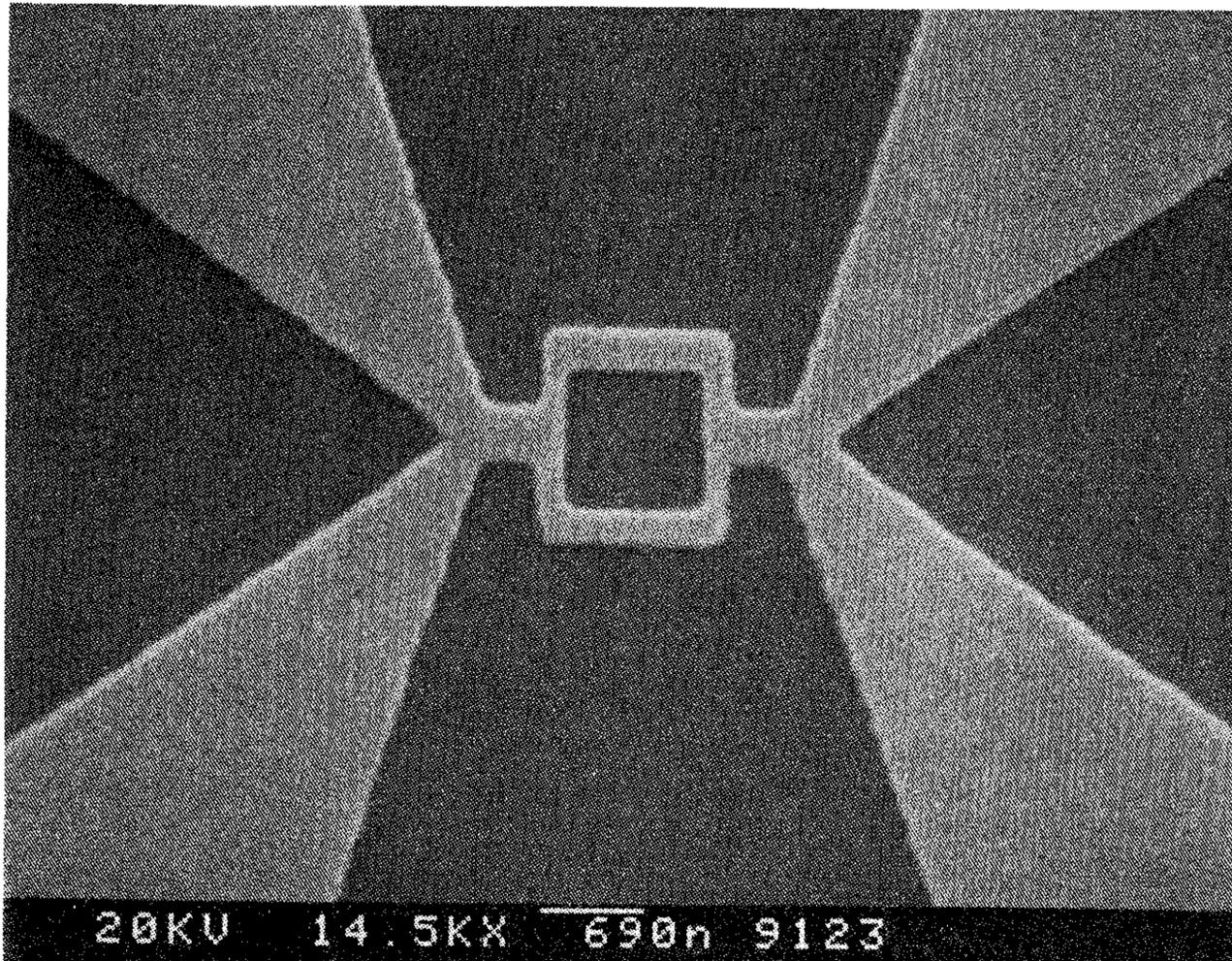


Fig. 3-3-3. SEM micrograph of an Ag Aharanov-Bohm device.

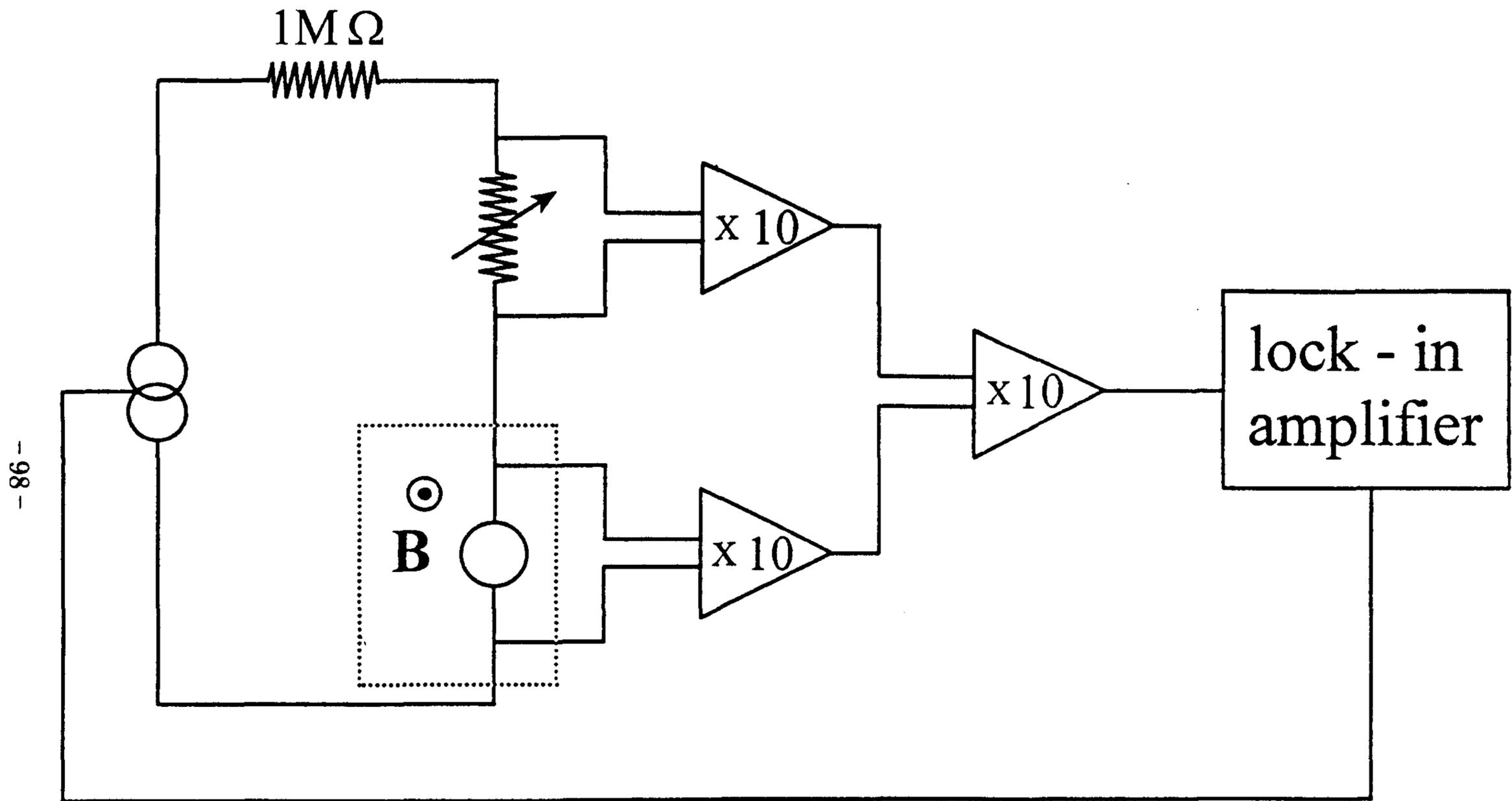


Fig. 3-3-4. Schematic diagram of Aharanov-Bohm effect measurement system.
 The dotted box indicates the $^3\text{He}/^4\text{He}$ dilution refrigerator.

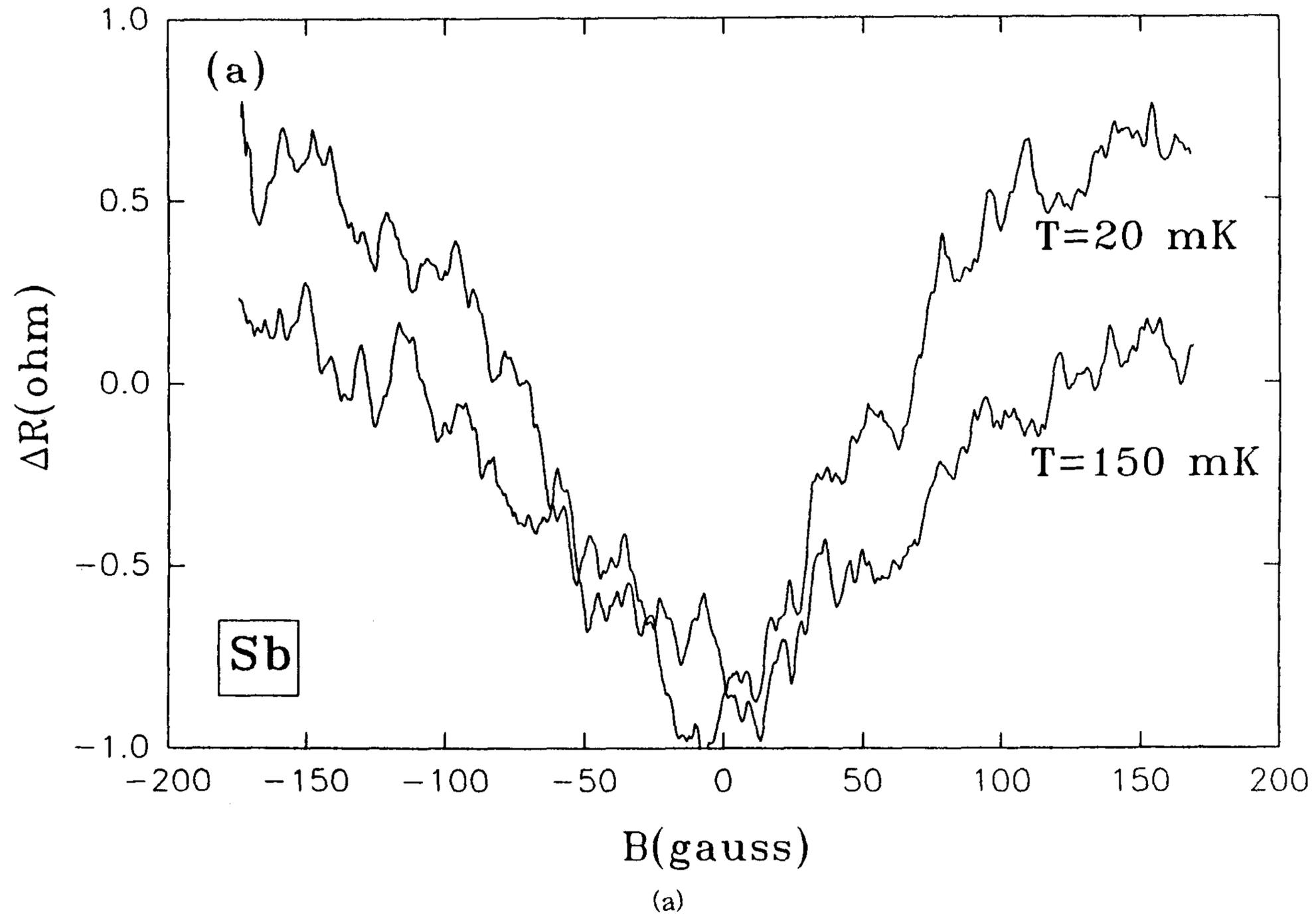
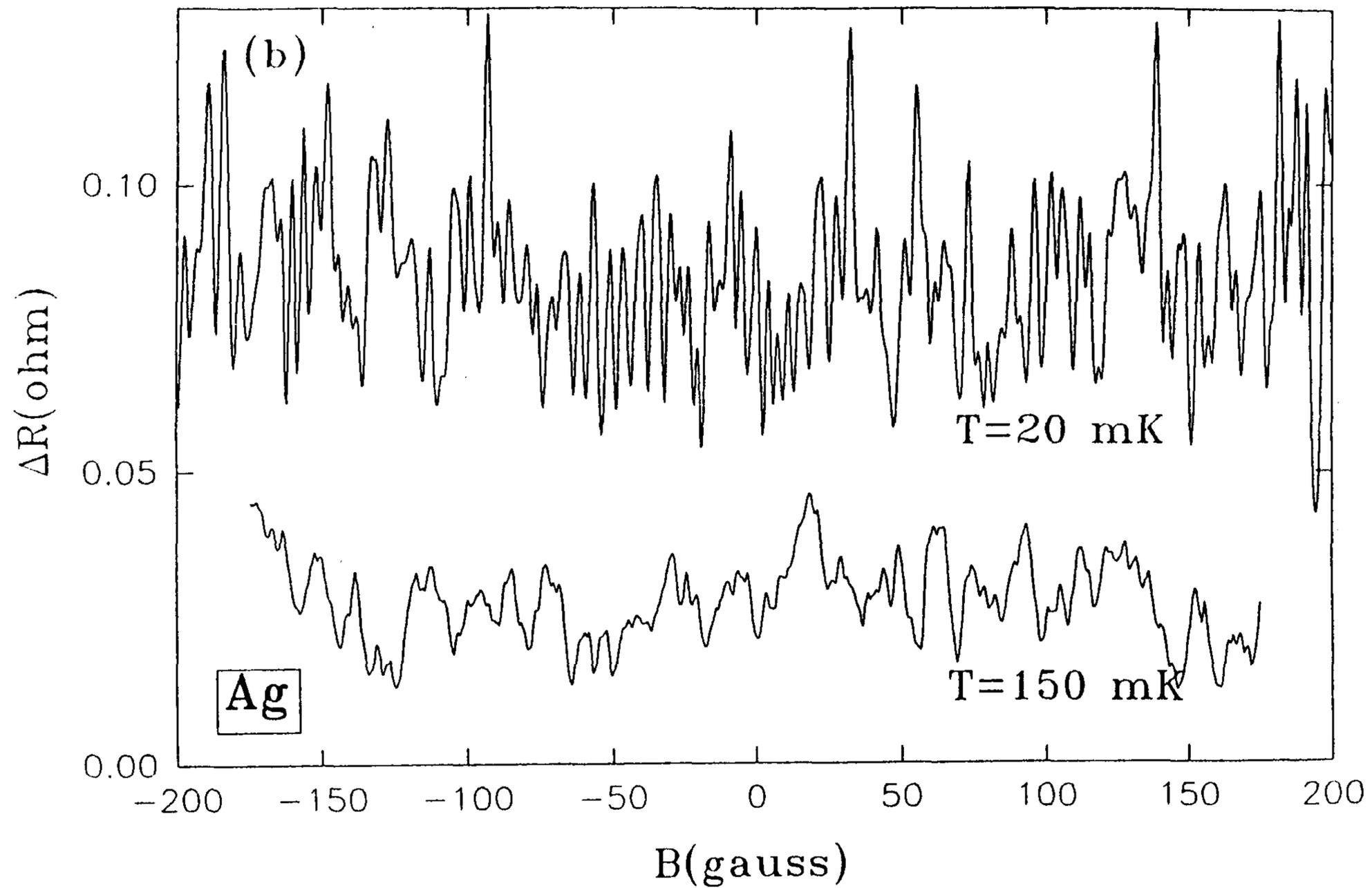
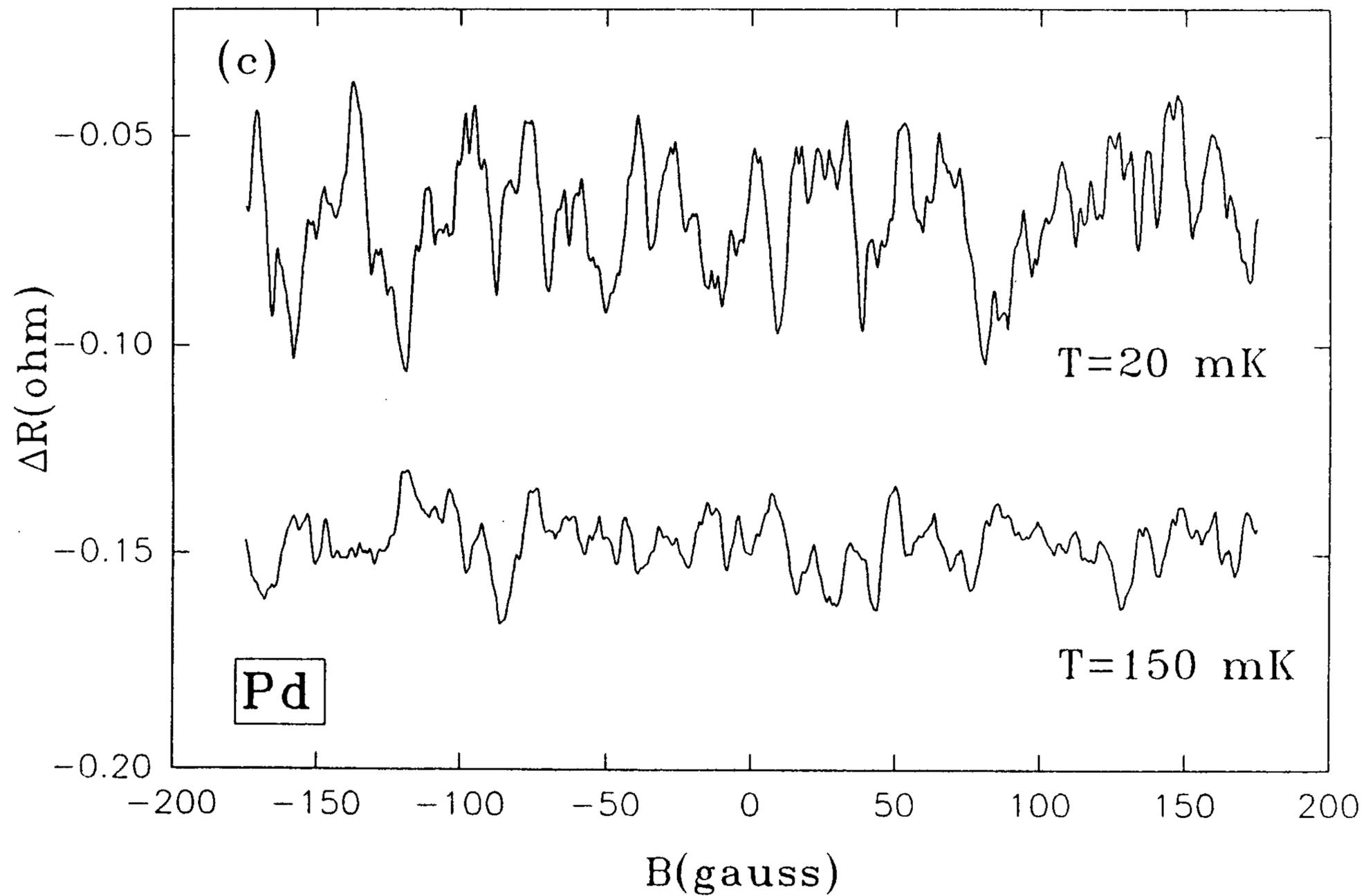


Fig. 3-3-5. Magnetoresistance data of (a) Sb ring, (b) Ag ring, and (c) Pd ring at $T=20$ and 150 mK



(b)

Fig. 3-3-5. continued



(c)

Fig. 3-3-5. continued

μm , 저항이 123Ω 이었다. 한편 Pd 소자는 변의 길이가 $1.04 \mu\text{m}$, 선폭이 $0.2\text{-}0.3 \mu\text{m}$, 저항이 26Ω 이었다. 온도가 높아짐에 따라 세소자 모두 AB oscillation의 진폭이 작아졌다.

그림 3-3-6 (a), (b), (c)는 그림 3-3-5 (a), (b), (c)의 data를 fast-Fourier transform한 결과이다. 그림 3-3-5 (a), (b), (c)에서는 AB oscillation이 분명하게 보이지 않았으나 FFT한 그림 3-3-6 (a), (b), (c)에서는 h/e oscillation에 해당하는 peak이 현저하게 나타났다. Sb 소자의 경우 AB oscillation의 주기인 ΔB 는 41.6 gauss 로 이것을 면적으로 환산하면 한변의 길이가 $1.0 \mu\text{m}$ 인 정사각형에 해당된다. Ag 소자의 경우는 ΔB 가 40.9 gauss 로 이것은 한변의 길이가 $1.01 \mu\text{m}$ 인 정사각형으로 환산될 수 있다. 그림 3-3-6 (c)에서 보여주는 Pd 소자의 ΔB 는 33.2 gauss 로 이것은 한변의 길이가 $1.12 \mu\text{m}$ 인 정사각형으로 환산될 수 있다. 세소자 모두 ΔB 로부터 추론한 소자의 크기가 SEM으로 관찰한 사각 고리모양 소자의 안쪽 사각형 보다는 크고 바깥쪽 사각형 보다는 작는데 이것은 전자의 path가 사각고리 모양 소자의 거의 가운데에 형성된다는 것을 의미한다 하겠다. 그림 3-3-6 (a), (b), (c)에서 peak width는 소자의 선폭과 매우 밀접한 관계를 보인다. 선폭이 가장 작은 Sb 소자에서 가장 좁은 FFT peak width가, 선폭이 가장 넓은 Pd 소자에서 가장 넓은 FFT peak width가 관측되었다.

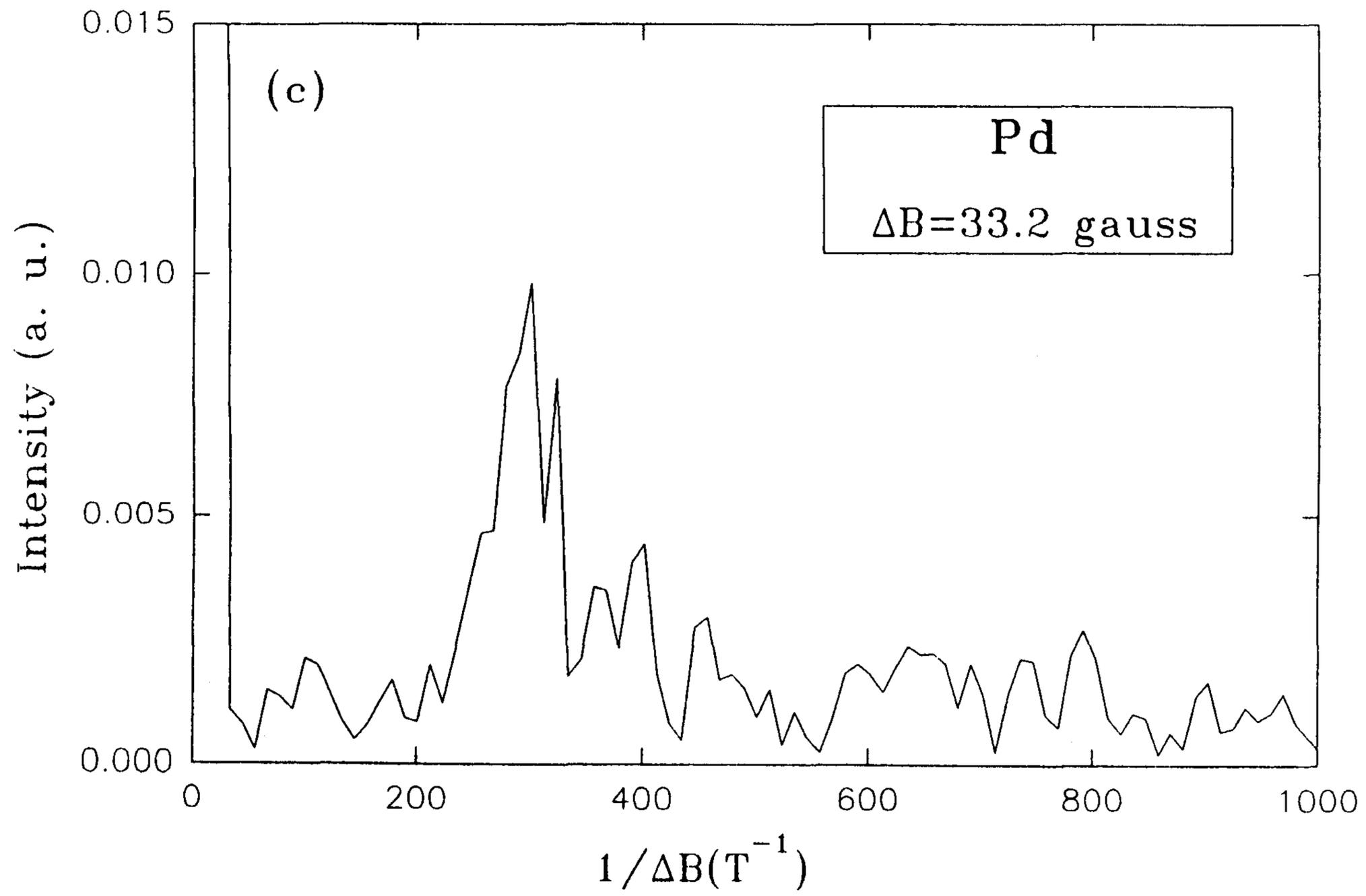
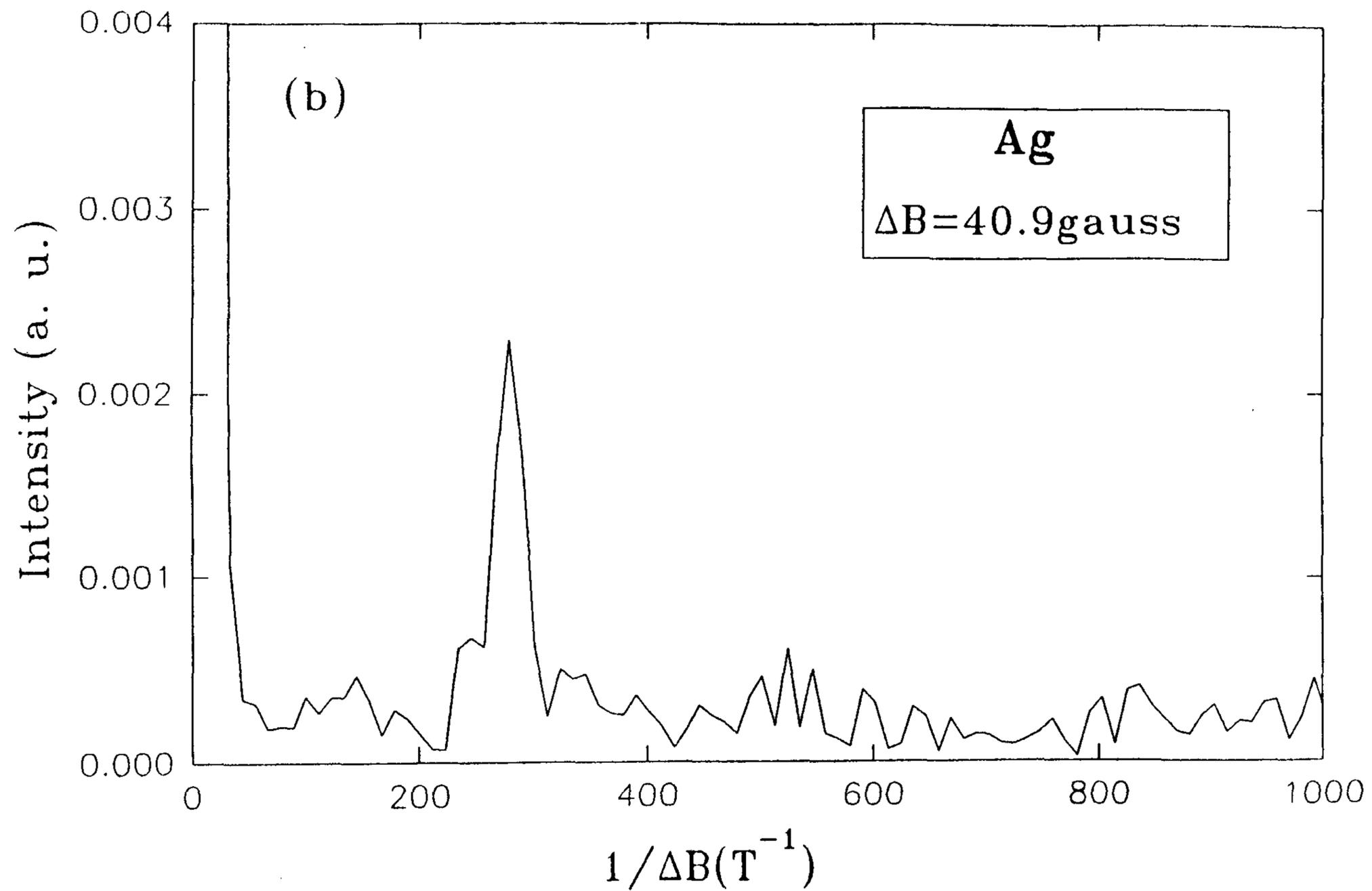


Fig. 3-3-6. continued



(b)

Fig. 3-3-6. continued

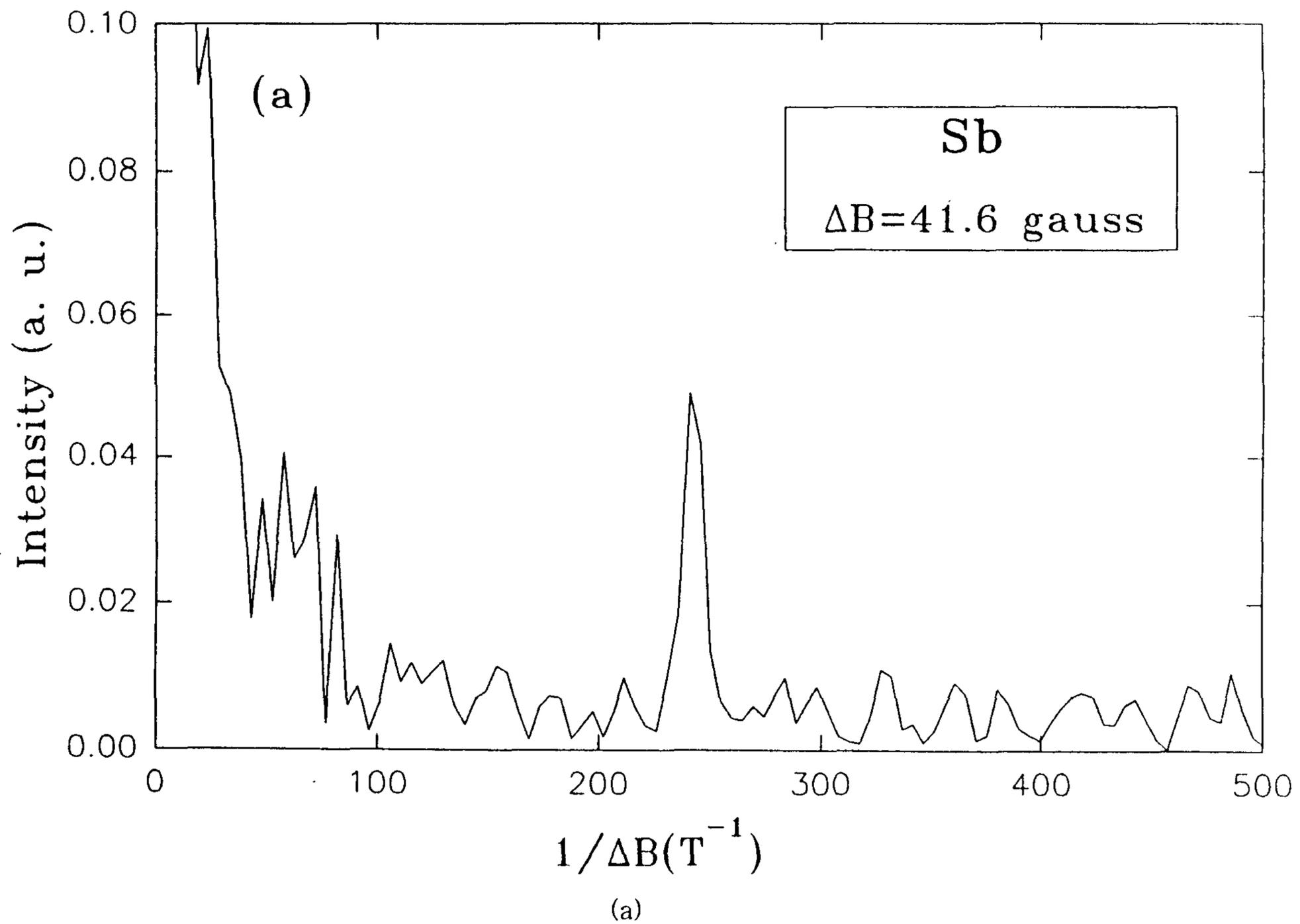


Fig. 3-3-6. (a), (b), and (c). The fast Fourier transform of the data in Figs, 3-3-5(a), (b), and (c), respectively

제 4 절 결 론

미소접합 제작을 위해서는 submicron 영역의 선폭을 제작할 수 있는 전자빔 식각 기술이 필요하다. 따라서 본 1차년도에는 주사형 전자현미경에 전자빔의 주사를 조절하여 writing할 수 있는 장치를 부착하여 전자빔 식각을 하기위해 주사형 전자현미경 (JEOL 6400)을 설치하였으며, writing할 수 있는 Proxy Write (독일 Raith 사 제품)을 구매하였다. 2차년도에는 Proxy Write를 주사형 전자현미경에 설치하여 본격적으로 전자빔 식각 기술을 연구할 계획이다.

미소접합 제작 및 단전자 효과를 연구하기에 앞서 가장 간단한 mesoscopic 소자라고 생각되는 Sb, Ag, Pd로 이루어진 사각고리 모양의 Aharonov-Bohm 소자를 제작하였으며, $T = 20$ mK과 150 mK에서 자기저항을 측정하였다. 측정된 자기저항을 fast Fourier transform시켰을 때 h/e 에 해당하는 비교적 분명한 peak을 관측할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] D. Esteve, in *Single Charge Tunneling*, edited by H. Grabert and M. H. Devoret, NATO ASI, Ser. B (Plenum Press, NY, 1992) Chap. 3
- [2] D. V. Averin and K. K. Likharev, in *Single Charge Tunneling*, edited by H. Grabert and M. H. Devoret, NATO ASI, Ser. B (Plenum Press, NY, 1992) Chap. 9
- [3] T. A. Fulton, and G. J. Dolan, *Phys. Rev. Lett.* 59, 109 (1987)
- [4] J. M. Martinis and M. Nahuim, *Phys Rev.* B48, 18316 (1993)
- [5] J. M. Martinis and M. Nahuim, and H. D. Jensen, *Phys. Rev. Lett.* 72, 904 (1994)
- [6] M. Branner and R. Schmid, *SEM Inc.*, 377 (1986)
- [7] T. S. Rao-Sahib and D. J. Wittry, *J. Appl. Phys.* 45, 5060 (1974)